

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Marko Filo**

Zagreb, 2012..

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Marko Filo

Zagreb, 2012..

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Dr.sc. Goranu Đukiću, koji mi je svojim strpljenjem i savjetima puno pomogao tijekom izrade ovog rada.

Marko Filo



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MARKO FILO**

Mat. br.: 0035158463

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MODELI RADNIH CIKLUSA U OBLIKOVANJU AUTOMATIZIRANIH VISOKOREGALNIH SKLADIŠTA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CYCLE COMMAND MODELS IN DESIGN OF AS/RS**

Opis zadatka:

U projektiranju automatiziranih skladišnih sustava određivanje radnih ciklusa automatskih dizalica predstavlja temelj za određivanje potrebnog broja dizalica uz uvjet ostvarenja zadanog protoka. Za proračun vremena radnih ciklusa postoji nekoliko modela, kao i softverska podrška.

U radu je potrebno:

- dati sažet prikaz značaja logistike, te područja skladištenja kao logističke funkcije,
- prikazati značaj i izvedbe automatiziranih skladišnih sustava,
- pojasniti varijacije izvedbi automatiziranih visokoregalna skladišta (eng. unit-load AS/RS),
- prikazati postojeće modele određivanja radnih ciklusa dizalice automatiziranog visokoregalnog skladišta,
- prikazati softverski paket ExASRS v2.0 (s ugrađenim modelima određivanja radnog ciklusa),
- za priloženi primjer (Case Study) ilustrirati korištenje softvera,
- analitičkim proračunom analizirati razlike između pojedinih modela radnih ciklusa, te ustanoviti njihov utjecaj na konačno projektirano rješenje.

Zadatak zadan:

14. studenog 2011.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Goran Đukić

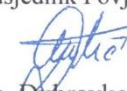
Rok predaje rada:

- 1. rok: 10. veljače 2012.
- 2. rok: 6. srpnja 2012.
- 3. rok: 14. rujna 2012.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 15., 16. i 17. veljače 2012.
- 2. rok: 9., 10. i 11. srpnja 2012.
- 3. rok: 19., 20. i 21. rujna 2012.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Dubravko Majetić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. SKLADIŠTENJE KAO LOGISTIČKA FUNKCIJA.....	2
2.1. Općenito o logistici .....	2
2.2. Skladišta .....	2
2.2.1. Podjela prema načinu gradnje .....	3
2.2.2. Podjela prema načinu skladištenja .....	3
3. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI .....	5
3.1. Horizontalni karuseli.....	5
3.2. Vertikalni karuseli.....	5
3.3. Vertikalni podizni moduli .....	6
3.4. Dizalica u prolazu .....	6
3.4.1. Automatizirano skladište za komisioniranje .....	7
3.4.2. Automatizirano skladište za male dijelove .....	7
3.4.3. Automatizirano visokoregalno skladište .....	8
4. AUTOMATIZIRANA VISOKOREGALNA SKLADIŠTA .....	9
4.1. Planiranje sustava.....	9
4.1.1. Ciljevi.....	9
4.1.2. Varijacije izvedbi .....	10
4.2. Projektiranje sustava .....	13
4.2.1. Osnovni dijelovi.....	13
4.2.2. Oprema za oblikovanje tereta .....	13
4.2.3. Određivanje radnih ciklusa .....	16
4.2.4. Određivanje redoslijeda odlaganja i izuzimanja .....	17
5. MODELI ODREĐIVANJA RADNIH CIKLUSA DIZALICE AUTOMATIZIRANOG VISOKOREGALNOG SKLADIŠTA .....	20
5.1. Model MHI .....	20

5.1.1.	Jednostruka prihvatna stanica s jednostrukim ciklusom .....	21
5.1.2.	Jednostruka prihvatna stanica s dvostrukim ciklusom .....	22
5.2.	Model FEM 9.851 .....	23
5.2.1.	Jednostruka prihvatna stanica s jednostrukim ciklusom .....	24
5.2.2.	Jednostruka prihvatna stanica s dvostrukim ciklusom .....	24
5.3.	Model Bozer/White .....	25
5.3.1.	Jednostruka prihvatna stanica s jednostrukim ciklusom .....	25
5.3.2.	Jednostruka prihvatna stanica s dvostrukim ciklusom .....	26
5.4.	Model Chang/Wen/Lin .....	26
5.5.	Model za višestruku prihvatnu stanicu s promjenom brzine .....	28
5.5.1.	FCFS pravilo .....	28
5.5.2.	Modificirano FCFS pravilo .....	29
5.5.3.	NN pravilo .....	30
5.5.4.	Modificirano NN pravilo .....	31
6.	SOFTVERSKI PAKET ExASRS v2.0 .....	32
6.1.	Općenito .....	32
6.2.	Algoritmi proračuna .....	33
6.3.	Ulazni parametri .....	34
6.3.1.	Unos .....	34
6.3.2.	Dugmad .....	37
6.4.	Izlazni parametri (rezultati) .....	38
6.4.1.	Osnovni rezultati .....	38
6.4.2.	Detaljniji rezultati .....	39
6.4.3.	Analiza osjetljivosti .....	41
6.4.4.	Povijest rezultata .....	44
7.	ANALIZA RAZLIKE IZMEĐU POJEDINIH MODELA ZA ODREĐIVANJE RADNIH CIKLUSA .....	45
7.1.	Analiza rezultata za jednostruki radni ciklus .....	47
7.2.	Analiza rezultata za dvostruki radni ciklus .....	48
8.	ZAKLJUČAK .....	54
	PRILOZI .....	55
	LITERATURA .....	56

## POPIS SLIKA

Slika 1. Horizontalni karusel, vertikalni karusel, vertikalni podizni modul .....	6
Slika 2. Automatizirano skladište za male dijelove .....	7
Slika 3. Automatizirano visokoregalno skladište .....	8
Slika 4. Prolaz jednostruke širine – Regal jednostruke širine .....	10
Slika 5. Prolaz jednostruke širine – Regal dvostruke dubine .....	10
Slika 6. Prolaz dvostruke širine – Regal dvostruke dubine .....	11
Slika 7. Regal s protočnom trakom .....	11
Slika 8. Duboka traka s vozilom na dizalici .....	12
Slika 9. Dizalica s jednostrukom prihvatnom stanicom .....	12
Slika 10. Dizalica s višestrukom prihvatnom stanicom .....	12
Slika 11. Skica palete .....	14
Slika 12. Skica klizača .....	14
Slika 13. Skica klizača .....	14
Slika 14. Skica kartonske kutije .....	15
Slika 15. Skica bačve .....	15
Slika 16. Skica sanduka .....	15
Slika 17. „Prvi ulazi -prvi izlazi“ redoslijed ciklusa .....	18
Slika 18. Modificirani „Prvi ulazi -prvi izlazi“ redoslijed ciklusa .....	18
Slika 19. „Najbliži susjed“ redoslijed ciklusa .....	19
Slika 20. Modificirani "najbliži susjed" redoslijed ciklusa .....	19
Slika 21. Metoda izračunavanja jednostrukog radnog ciklusa MHI modelom .....	21
Slika 22. Metoda izračunavanja dvostrukog radnog ciklusa MHI modelom .....	22
Slika 23. FEM model .....	23
Slika 24. Unos ulaznih parametara .....	34
Slika 25. Pomoćni kalkulator za izračun visine i širine skladišne lokacije .....	35
Slika 26. Korištenje dugmadi u softverskom paketu .....	37
Slika 27. Tablični prikaz osnovnih rezultata .....	38
Slika 28. Skica automatiziranog visokoregalnog skladišta .....	38
Slika 29. Tablica detaljnih rezultata .....	39
Slika 30. Meni s pet različitih analiza osjetljivosti sustava .....	41

---

Slika 31. Prozor za unos raspona propusnosti, te cijene dizalice i skladišne lokacije .....	42
Slika 32. Analiza osjetljivosti prikazana na desnoj strani lista "ASRS Design&Analysis" ....	43
Slika 33. Sve analize osjetljivosti prikazane na listu „Sensitivity Analysis Summary“ .....	43
Slika 34. List "Tablica rezultata" .....	44
Slika 35. Grafički prikaz rezultata za skladište 1. za jednostavni ciklus .....	50
Slika 36. Grafički prikaz rezultata za skladište 2. za jednostavni ciklus .....	50
Slika 37. Grafički prikaz rezultata za skladište 3. za jednostavni ciklus .....	51
Slika 38. Grafički prikaz rezultata za skladište 4. za jednostavni ciklus .....	51
Slika 39. Grafički prikaz rezultata za skladište 1. za složeni ciklus.....	52
Slika 40. Grafički prikaz rezultata za skladište 2. za složeni ciklus.....	52
Slika 41. Grafički prikaz rezultata za skladište 3. za složeni ciklus.....	53
Slika 42. Grafički prikaz rezultata za skladište 4. za složeni ciklus.....	53



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Pregled radnih ciklusa .....	16
Tablica 2. Prikaz analiziranih skladišnih kapaciteta i oblika u SI sustavu mjera.....	46
Tablica 3. Prikaz analiziranih skladišnih kapaciteta i oblika u američkom sustavu mjera .....	46
Tablica 4. Prikaz rezultata za jednostruki radni ciklus (1. dio).....	47
Tablica 5. Prikaz rezultata za jednostruki radni ciklus (2. dio).....	47
Tablica 6. Prikaz rezultata za dvostruki radni ciklus (1. dio).....	48
Tablica 7. Prikaz rezultata za dvostruki radni ciklus (2. dio).....	48

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a_x$	$m/s^2$	Horizontalno ubrzanje dizalice
$a_y$	$m/s^2$	Vertikalno ubrzanje dizalice
$b$		faktor oblika
$d$	s	Vrijeme skladištenja
$e_{dc}$	s	Normalizirano vrijeme dvostrukog ciklusa
$e_{dcNN}$	s	Normalizirano vrijeme dvostrukog ciklusa prema pravilu NN
$e_{izm}$	s	Normalizirano vrijeme vožnje između ciklusa
$e_{izm}'$	s	Normalizirano vrijeme vožnje između ciklusa s promjenom brzine
$e_{jc}$	s	Normalizirano vrijeme jednostrukog ciklusa
$e_{jc}'$	s	Normalizirano vrijeme jednostrukog ciklusa s promjenom brzine
$e_{mqc}$	s	Normalizirano vrijeme četverostrukog ciklusa
$e_{mxc}$	s	Normalizirano vrijeme modificiranog šesterostrukog ciklusa
$e_{qcNN}$	s	Normalizirano vrijeme četverostrukog ciklusa prema modificiranom pravilu NN
$e_{qcNN}$	s	Normalizirano vrijeme četverostrukog ciklusa prema pravilu NN
$e_{SAq}$	s	Najkraće normalizirano vrijeme putovanja od posljednje lokacije do U/I stanice. Vidi jedn. (35) iz [6]
$e_{SAs}$	s	Najkraće normalizirano vrijeme putovanja od posljednje lokacije do U/I stanice. Vidi jedn. (27) iz [6]
$e_{SWm}$	s	Najkraće normalizirano vrijeme putovanja od U/I stanice do jedne od m slobodnih lokacija. Vidi jedn. (16) iz [6]
$e_{TB(m-1)}$	s	Najkraće normalizirano vrijeme putovanja između trenutne i iduće m-1 slobodne lokacije. Vidi jedn. (24) iz [6]
$e_{TB(m-2)}$	s	Najkraće normalizirano vrijeme putovanja između trenutne i iduće m-2 slobodne lokacije. Vidi jedn. (24) iz [6]
$e_{TB2}$	s	Najkraće normalizirano vrijeme putovanja između trenutne i najbliže lokacije izuzimanja. Vidi jedn. (24) iz [6]
$e_{TB3}$	s	Najkraće normalizirano vrijeme putovanja između trenutne i najbliže lokacije izuzimanja. Vidi jedn. (24) iz [6]
$e_{tcNN}$	s	Normalizirano vrijeme trostrukog ciklusa prema pravilu NN
$e_{xcmNN}$	s	Normalizirano vrijeme šesterostrukog ciklusa prema modificiranom pravilu NN
$e_{xcNN}$	s	Normalizirano vrijeme šesterostrukog ciklusa prema pravilu NN
$H$	m	Visina skladišta
$k_{izm}$	s	Normalizirana konstanta za vrijeme voženje između ciklusa s promjenom brzine
$k_{jc}$	s	Normalizirana konstanta za vrijeme jednostrukog ciklusa s promjenom brzine
$L$	m	Duljina skladišta

M		Broj prolaza
m		Broj slobodnih lokacija
p	s	Vrijeme izuzimanja
Q	paletna mjesto	kapacitet sustava
q	paleta/h	Protok sustava
T		faktor mjera
$t_{dc}$	s	Vrijeme dvostrukog ciklusa
$t_{dcNN}$	s	Vrijeme dvostrukog ciklusa prema pravilu NN
$t_h$	s	Vrijeme potrebno da dizalica dođe od U/I stanica do najudaljenije horizontalne lokacije
$t_{izm}$	s	Vrijeme vožnje između ciklusa
$t_{jc}$	s	Vrijeme jednostrukog ciklusa
$t_k$	s	Vrijeme za utovar/istovar
$t_{mqc}$	s	Vrijeme modificiranog četverostrukog ciklusa
$t_{mxc}$	s	Vrijeme modificiranog šesterostrukog ciklusa
$t_{qc}$	s	Vrijeme četverostrukog ciklusa
$t_{qcNN}$	s	Vrijeme četverostrukog ciklusa prema modificiranom pravilu NN
$t_{qcNN}$	s	Vrijeme četverostrukog ciklusa prema pravilu NN
$t_{tc}$	s	Vrijeme trostrukog ciklusa
$t_{tcNN}$	s	Vrijeme trostrukog ciklusa prema pravilu NN
$t_v$	s	Vrijeme potrebno da dizalica dođe od U/I stanica do najudaljenije vertikalne lokacije
$t_{v01}$	s	Vrijeme vožnje dizalice od točke 0 do točke 1
$t_{v12}$	s	Vrijeme vožnje dizalice od točke 1 do točke 2
$t_{v20}$	s	Vrijeme vožnje dizalice od točke 2 do točke 0
$t_x$	s	Vrijeme vožnje dizalice do x skladišne lokacije
$t_{x,y}$	s	Vrijeme vožnje dizalice do skladišnog mjesta određenog koordinatama x i y
$t_{xc}$	s	Vrijeme šesterostrukog ciklusa
$t_{xcmNN}$	s	Vrijeme šesterostrukog ciklusa prema modificiranom pravilu NN
$t_{xcNN}$	s	Vrijeme šesterostrukog ciklusa prema pravilu NN
$t_y$	s	Vrijeme vožnje dizalice do y skladišne lokacije
$v_x$	m/s	Horizontalna brzina dizalice
$v_y$	m/s	Vertikalna brzina dizalice

## SAŽETAK

Prikazana je podjela automatiziranih skladišnih sustava prema američkoj organizaciji za rukovanje materijalom. Opisano je automatizirano visokoregalno skladište, objašnjeni su razlozi planiranja i navedeni neki od ciljeva gradnje ovakvog sustava. Za potrebe projektiranja sustava navedeni su osnovni dijelovi sustava, oprema za oblikovanje tereta, način određivanja radnih ciklusa i redoslijeda odlaganja, odnosno izuzimanja. U drugom dijelu prezentirani su modeli određivanja jednostavnih i složenih radnih ciklusa za dizalice s jednostrukom prihvatnom stanicom (model MHI, model FEM 9.851, model Bozer/White i model Chang/Wen/Lin). Za dizalice s višestrukom prihvatnom stanicom prikazan je model Chang/Wen/Lin s uključenim ubrzanjem i usporenjem po pravilima "prvi ulazi - prvi izlazi" i "najbliži susjed" te njihovim modifikacijama. Zatim je dan pregled ulaznih i izlaznih parametara te kratke upute za korištenje softverskog paketa ExASRS v2.0 koji se upotrebljava za proračun vremena radnih ciklusa s uključenom promjenom brzine. Napravljena je analiza modela radnih ciklusa u oblikovanju automatiziranih visokoregalnih skladišta uz promjenu ulaznih parametara.

## 1. UVOD

Trendovi u proizvodnoj industriji i distribuciji robe pred logistiku postavljaju zahtjeve za dopremu robe na zadanu lokaciju u najkraćem mogućem roku i uz minimalne pogreške. Nude se razne izvedbe podnih i regalnih skladišta, no u današnje vrijeme teži se informatizaciji i automatizaciji i tu su se kao jedan od najrazvijenijih, u odnosu na ostalu industrijsku mehanizaciju, pokazali automatizirani skladišni sustavi.

Automatizirani skladišni sustavi su računalno kontrolirani transportni sustavi za efektivno i pouzdano odlaganje i izuzimanje te prijenos materijala, poluproizvoda i proizvoda. U potpunosti ih je moguće integrirati u proizvodni i distribucijski proces, čime se povećava produktivnost, a smanjuju troškovi izgradnje, energije, rada, i održavanja. U radu je prikazana podjela automatiziranih skladišnih sustava, a jedna od vrsta je automatizirano visokoregalno skladište čiji su tereti teži od 250 kilograma.

Automatizirana visokoregalna skladišta odlikuje velika brzina rada i točnost pri manipulaciji robom i posluživanju regala. Kroz rad su prikazani razni elementi sustava koji su vitalni faktori pri implementaciji uspješnog projekta. Logičnim redoslijedom su navedeni koraci od formiranja plana, ciljeva, opravdanja do svih ostalih razmatranja pri projektiranju.

Jedan od važnijih dijelova u procesu je određivanje vremena radnih ciklusa dizalice. Prezentirana su tri osnovna modela (MHI, FEM 9.851 i Bozer/White) koji u proračun nemaju uključenu promjenu brzine. Obzirom da su ubrzanje i usporenje bitni faktori pri odabiru dizalice, na temelju modela Bozer/White i razmatranja Chang, Wen i Lina te Hwang i Leea napravljen je hibridni model koji za razliku od prethodnih, u proračun ima uključenu promjenu brzine.

Za potrebe analize modela odabrana su četiri skladišta različitih kapaciteta. Svako od odabranih skladišta podijeljeno je na tri oblika kako bi se utvrdila točnost pojedinog modela.

## 2. SKLADIŠTENJE KAO LOGISTIČKA FUNKCIJA

### 2.1. Općenito o logistici

Logistika je znanstvena disciplina koja se bavi upravljanjem toka materijala, svladavanjem prostora i vremena radi optimizacije ukupnih troškova. Označava poslovnu funkciju i znanstvenu disciplinu koja integrira rukovanje, transport, pakiranje te skladištenje materijala, proizvoda i robe u informacijskom i organizacijskom smislu. To je kružni proces od nabave preko proizvodnje i prodaje do potrošača. Složenost proizvodne logistike znatno je pojednostavljena razvojem tehnologije koja je omogućila analiziranje, standardiziranje, vizualizaciju i optimizaciju tvornica i skladišta.

Kao poslovna funkcija, logistika obuhvaća sve djelatnosti potrebne za kompleksnu pripremu te realizaciju prostorne i vremenske transformacije dobara i znanja. Uporabom ljudskih resursa i sredstava u sustavima, logistika nastoji staviti na raspolaganje tržištu tražena dobra u pravo vrijeme na pravom mjestu u traženoj količini, kvaliteti i cijeni s točnim informacijama. Kako bi se postigla veća profitabilnost, naglašeni su minimalni troškovi i optimizacija.

Poslovna logistika ima poseban značaj u poduzećima jer skraćuje bitan dio vremena i troškova procesa. Poduzeća su se uvjerila da primjenom logističkih načela i metoda mogu uvelike smanjiti troškove, odnosno ostvariti povećanje profita.

### 2.2. Skladišta

Skladište označava mjesto uređeno i opremljeno za privremeno i sigurno odlaganje, pohranjivanje, pripremu i izdavanje materijala ili robe. Mogu biti ograđeni ili neograđeni, pokriveni ili nepokriveni prostori koji se koriste za čuvanje sirovina, poluproizvoda, gotovih proizvoda ili alata i naprava. Služi za preuzimanje i otpremu robe ili dobara te čuvanje od raznih fizičkih, kemijskih i atmosferskih utjecaja. Idealno bi bilo da poduzeće nema skladište, no nemoguće je ostvariti proizvodni proces bez da roba u nekoj fazi miruje. To direktno povećava ukupne troškove poslovanja te je očito da skladišna logistika ima veliku ekonomsku važnost u poduzeću. Zbog toga je optimizacija skladištenja, odnosno svi procesi koji su potrebni da bi se roba što ekonomičnije posložila u skladištu i što brže isporučila krajnjim korisnicima, važan dio procesa skladištenja i oblikovanja skladišta.

### **2.2.1. Podjela prema načinu gradnje**

Prema načinu gradnje skladišta dijelimo na tri tipa; otvorena, zatvorena i natkrivena. U otvorenim skladištima se čuvaju materijali i roba koja je vrlo malo ili neosjetljiva na kemijske i atmosferske utjecaje, dok u zatvorenima skladištimo robu osjetljivu na vremenske utjecaje. Natkrivena skladišta koriste se za robu kojoj je potrebno stalno provjetravanje.

### **2.2.2. Podjela prema načinu skladištenja**

#### Podna skladišta

Podna skladišta nemaju opremu za smještaj materijala već se roba odlaže direktno na pod. Jedinica skladištenja obično je podložak (paleta) ili nasložni sanduk s materijalom, a kao transportno sredstvo najčešće se koriste (podni) viličari. Takva skladišta imaju malu iskoristivost obujma skladišta, pa da bi se to izbjeglo, koristi se naslagivanje jedinica skladištenja. Visina naslagivanja obično iznosi do 5 m, odnosno 3 do 6 nasložnih jedinica skladištenja. Pritom je potrebno voditi računa o vremenu skladištenja materijala, kakvoći poda, stabilnosti jedinice skladištenja i transportnom sredstvu. Materijal se može odlagati nasipavanjem ili gomilanjem, slobodnim rasporedom i skladištenjem u redove ili blokove. Ukoliko skladištimo veće količine istovrsne robe preporuča se skladištenje u blokove, dok se za slučaj većeg asortimana i manje količine robe preporuča skladištenje u redove. Za potonji oblik skladištenja iskoristivost podne površine je 20 do 30% i svakoj jedinici skladištenja moguć je izravan pristup. Nedostaci kod ovakvog tipa skladišta su poteškoće prilikom rukovanja materijalom i pokušaja automatizacije sustava te loša iskoristivost podnog i volumnog prostora, dok su niže investicije i jedinični troškovi prednosti prilikom gradnje podnog skladišta.

#### Regalna skladišta

Prilikom skladištenja komadnog materijala najčešće se koriste regalna skladišta. Dobra organiziranost, visok stupanj automatizacije i upravljanja te sigurnost neke su od prednosti takvih sustava. Osnovna komponenta ovog skladišta su regali čije su izvedbe danas mnogobrojne. **Polični i paletni regali** služe za odlaganje jedinice skladištenja poprečno ili uzdužno na policu, odnosno, nosače. Postavljaju se u jednostruke ili dvostruke redove, a transportna sredstva najčešće su viličari. **Konzolni regali** služe za odlaganje materijala s jednom ili dvije karakteristične dimenzije poput šipki i limova, mogu se postaviti u zatvorenim i otvorenim prostorima, a transportna sredstva su također viličari, viličari-granici ili granici. **Stupni ili prolazni regali** koriste se za skladištenje većih količina istovrsnog

materijala koji duže stoji na skladištu, a dobra iskoristivost površine i niska cijena izvedbe neke su od prednosti. Kod ovakvih regala materijal se odlaže po načelu FI-FO<sup>1</sup> ili LI-FO<sup>2</sup>, a kao transportno sredstvo koristi se viličar. **Protočni regali** koriste se za dinamičko skladištenje materijala koje se ostvaruje nosivom stazom regala. Staza može biti bez pogona s kutom nagiba od 1 do 5%. U tom slučaju nazivaju se još i gravitacijski regali. Ukoliko staza ima pogon, on može biti u obliku valjkaste, lančane ili trakaste pruge ili transportne platforme. Odlaganje je po principu FI-FO ili LI-FO, a na svakom ulazu odnosno izlazu je po jedno transportno sredstvo. Visine takvih regala su do 12 m, a duljina do 20 m. **Pomični regali** su izvedbe policičnih, paletnih ili konzolnih regala učvršćeni na pokretnom postolju. Opterećenja s ručnim pogonom mogu biti do 200 kN po regalu, dok ona s motornim pogonom mogu biti opterećena i s više od 200 kN. **Optočni regali** služe za odlaganje materijala manjih dimenzija i težina na policama. Jednostavno se automatiziraju, materijal je zaštićen, a skladištenje sigurno. **Visoki regali** koriste se kod skladišta s policičnim ili paletnim regalima visine do 50 m. Visok stupanj automatizacije i preciznost glavne su odlike ovakvih sustava. Način rada, izvedbe i radni ciklusi detaljno su objašnjeni u nastavku ovog rada.

---

<sup>1</sup> FI-FO – first in, first out. Hrvatski prijevod: PU-PI – prvi ulazi, prvi izlazi

<sup>22</sup> LI-FO – last in, first out. Hrvatski prijevod: ZU-PI – zadnji ulazi, prvi izlazi



### 3. AUTOMATIZIRANI SKLADIŠNI SUSTAVI

Automatizirani skladišni sistemi rade po principu „roba - čovjeku“, a koriste se u proizvodnim pogonima, distribucijskim centrima te veleprodajnim i maloprodajnim trgovinama. Prednosti ovakvih sustava su ušteda prostora i vremena, povećanje produktivnosti radnika, točnost i sigurnost naručene robe. Obzirom da je danas trend u industriji da roba bude na pravom mjestu u pravo vrijeme, ovakvi skladišni sustavi idealni su kod „vitke proizvodnje“, six sigma, Just-in-time i sličnih metodologija u proizvodnji.

Prema neprofitnoj američkoj organizaciji MHIA automatizirani skladišni sustavi dijele se na: dizalica u prolazu (eng. Crane-in-aisle ASRS) i karuseli/vertikalni podizni moduli. Oba segmenta obavljaju istu funkciju, no tehnologija skladištenja im je različita. Dizalica u prolazu je veliki sistem koji je ima duge prolaze i roba se bočno skladišti na visoke regale, dok su karuseli individualni sustavi postavljeni u skladište gdje se roba skladišti vertikalno ili horizontalno.

#### 3.1. Horizontalni karuseli

Horizontalni karuseli ili okretni regali su uređaji za pohranu robe, a sastoje se od fiksnog broja skladišnih kolona ili odjeljaka koji su mehanički povezani s gornjim ili donjim pogonskim mehanizmom i tako čine zatvorenu petlju. Svaka kolona podijeljena je na određeni broj skladišnih lokacija ili ćelija. Roba se stavlja u posude ili tankove koji se skladište, izuzimaju ručno ili putem automatskog mehanizma. Određeno skladišno mjesto dovede se do mjesta komisioniranja pomoću rotacije karusela te se zbog toga ovaj princip naziva još i „roba - čovjeku“. Korištenjem ovakvih sistema štedi se do 75% podnog prostora, a produktivnost se može povećati i do 65%.

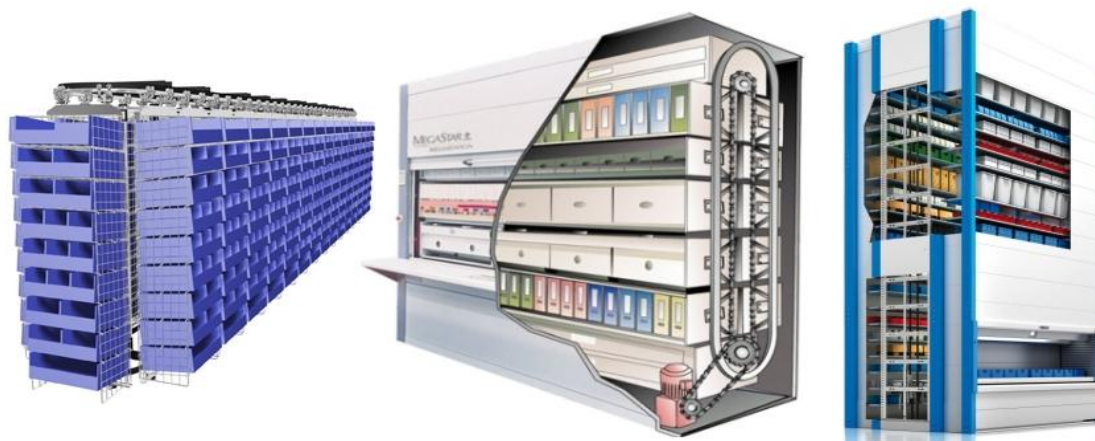
#### 3.2. Vertikalni karuseli

Vertikalni karuseli također su okretni regali sa zatvorenom petljom čija rotacija je automatizirana. U ovom slučaju se uređaj sastoji od fiksnog broja polica koje rotiraju u vertikalnoj ravnini, a mogu sadržavati više mjesta za posude ili tankove. Ukoliko je potrebno rukovati većim teretom, poput rola tepiha ili tkanine, police se ne dijele na manja mjesta već se koristi cijela dužina karusela. Skladištenje artikala u ovakvim sistemima je vertikalno te su u skladištima s ograničenim podnim prostorom ovakvi karuseli vrlo popularni. Moguće je automatizirati skladištenje ili izuzimanje materijala ili tereta no nepraktično je, stoga nije ni toliko uobičajeno.

### 3.3. Vertikalni podizni moduli

(eng. Vertical Lift Module)

Vertikalni podizni modul je skladišni sistem koji sadrži tri paralelne vertikalne kolone. Dvije kolone podijeljene su na određeni broj polica na koje se skladišti roba, dok središnja služi za podizanje ili spuštanje tereta. Za odlaganje, izuzimanje i transport obično se koriste kutije ili ladice koje automatski uređaj poput lifta donosi na zadanu lokaciju. Lokacije polica su jedinične dubine kako bi prijevozno sredstvo moglo dignuti ili spustiti u prostoru između skladišnih kolona. Sustav je vrlo prilagodljiv i postoji mogućnost korištenja cjelokupne visine zgrade tako da se ugradi kroz nekoliko katova. Ovakav inovativan način skladištenja robe dopušta da na svakom katu bude po jedna ulazna izlazna stanica i time se poveća efikasnost procesa komisioniranja.



Slika 1. Horizontalni karusel, vertikalni karusel, vertikalni podizni modul

### 3.4. Dizalica u prolazu

(eng. Crane-in-aisle Automated Storage Retrieval System)

Automatizirani skladišni sistemi s dizalicom u prolazu sastoje se od jednog ili više dugih i uskih prolaza koji s obje strane imaju čelične regale koji služe za skladištenje i izuzimanje tereta. Dizalica se na podnim (ponekad, zbog vertikalne točnosti i stropnim) tračnicama kreće vertikalno i horizontalno između učvršćenih regala kako bi pronašla zadanu lokaciju. Zatim uređaj za rukovanje teretom, koji može imati od jedne do tri prihvatne stanice, skladišti ili izuzima teret. Sva tri gibanja stroja, horizontalno (niz prolaz), vertikalno i skladištenje, izuzimanje su nezavisna i upravljana računalom.

Neki sofisticirani sistemi koriste i više dizalica po prolazu, no većina koristi jedan, što je sasvim dovoljno za normalno funkcioniranje sustava.

### **3.4.1. Automatizirano skladište za komisioniranje**

(eng. Person-on-board S/RS)

Jedini sustav komisioniranja robe po principu „čovjek robi“ s dizalicom u prolazu je automatizirano skladište za komisioniranje. U ovom (polu)automatiziranom sustavu dizalica stane ispred skladišne lokacije i čovjek na dizalici ručno izuzima robu unutar prolaza između visokih poličnih i paletnih regala.

### **3.4.2. Automatizirano skladište za male dijelove**

(eng. Micro-load AS/RS i Mini-load AS/RS)

Micro-load ASRS je tip sustava automatiziranog skladišta čija je ukupna težina tereta manja od 50 kg. Proizvodi se skladište u vrlo malim spremnicima (kutijama ili policama), a umjesto uređaja za rukovanje teretom koriste se izvlačni sistemi koji uhvate teret za ručke na pladnjevima ili pomoću vakuumskih hvatala.



**Slika 2. Automatizirano skladište za male dijelove**

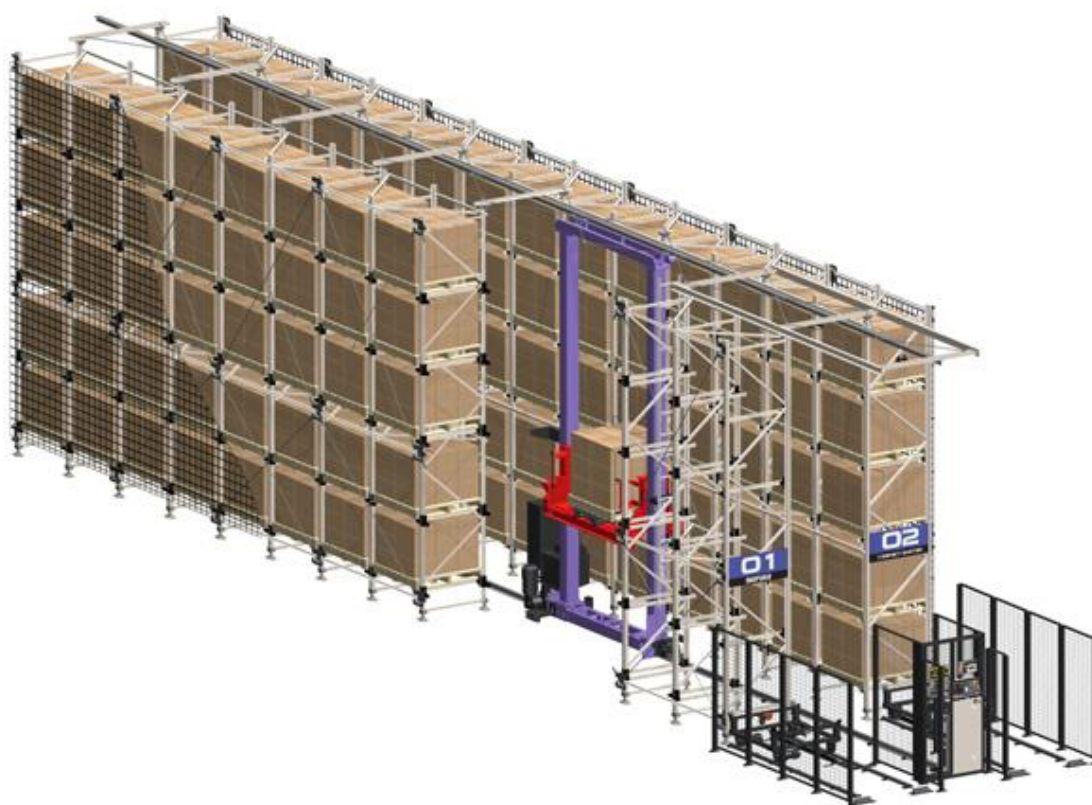
Mini-load ASRS je tip sustava automatiziranog skladišta čija ukupna težina tereta iznosi od 50 do 250 kg, u iznimnim slučajevima i do 500 kg. Teret se obično postavlja u manje spremnike, kartonske kutije ili na police, širine samo 25 cm. Koriste se za pohranu dokumenata, knjiga ili manjih proizvoda.

### 3.4.3. Automatizirano visokoregalno skladište

(eng. Unit-Load AS/RS)

Velike sustave koji se koriste za skladištenje paletnih tereta nosivosti preko 450 kg nazivamo automatizirana visokoregalna skladišta. Obično visoki do 50 m, mogu biti dugi i do 290 m, a širina prolaza je oko 1 metar. Specijalizirani sistemi mogu rukovati vrlo teškim teretom koji nisu na paletama poput namještaja ili rola materijala.

Regal za paletu može biti jedinične dubine ili s više paleta skladištenih jedna iza druge. Teleskopski uređaj poseže u paletnu lokaciju, klizne ispod palete i izvuče teret te ga postavlja na lift. Stariji modeli imali su stroj za skladištenje i izuzimanje u obliku tornja s rotirajućom viljuškom koji su mnogo sporiji ali se lakše prilagođavaju bilo kojem obliku paletnog regala.



**Slika 3. Automatizirano visokoregalno skladište**

## 4. AUTOMATIZIRANA VISOKOREGALNA SKLADIŠTA

Automatizirano visokoregalno skladište je tip sustava u kojem se svakim teretom rukuje pojedinačno, a služi za odlaganje i izuzimanje tereta od 250 kg do 500 kg i više. Teret je smješten na paletama ili u plastičnim, drvenim ili metalnim sanducima. Sustav je računalno upravljan za automatsko skladištenje i izuzimanje robe sa zadanih lokacija za skladištenje. Koristi se kod skladišta s velikim količinama robe koju je potrebno skladištiti gdje je preciznost sustava i sigurnost materijala vrlo bitna kako ne bi došlo do oštećivanja i gdje je, zbog prostornih ograničenja, potrebna visoka gustoća skladištenja.

Skladišta ovakvog tipa imaju jedan ili više dugih i uskih prolaza duljine i do 290 metara koji s obje strane imaju čelične ili aluminijske konstrukcije. Čelični okviri, čije visine su od 10 do 50 metara, služe kao regali za pohranu na koje se skladišti teret.

Horizontalne brzine dizalica mogu biti od 1,8 do 4,4 m/s, dok su vertikalne od 0,4 do 1,3 m/s.

Brzina prihvatne stanice iznosi od 7,5 do 12 s.

Sve tri kretnje dizalice; horizontalno (niz prolaz), vertikalno (uz jarbol) i dizalica su međusobno nezavisne i računalno kontrolirane.

### 4.1. Planiranje sustava

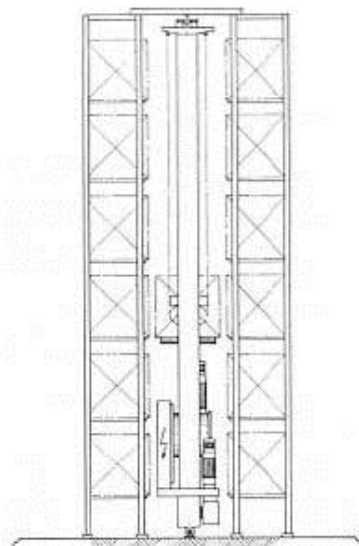
Automatizacija skladišnih operacija omogućuje smanjenje skladišnog prostora, povećanje točnosti u upravljanju inventarom, smanjenje troškova rada i smanjenje oštećenja proizvoda. Poželjno je da rukovanje u takvim sistemima budu što točnije sa što manjim investicijama. Sistem mora zadovoljiti određene zahtjeve za propusnost (broj zahtjeva za skladištenje i izuzimanje tereta u vremenu) i dimenzije skladišta, uzimajući u obzir ograničenja infrastrukture (npr. maksimalna visina zgrade).

#### 4.1.1. Ciljevi

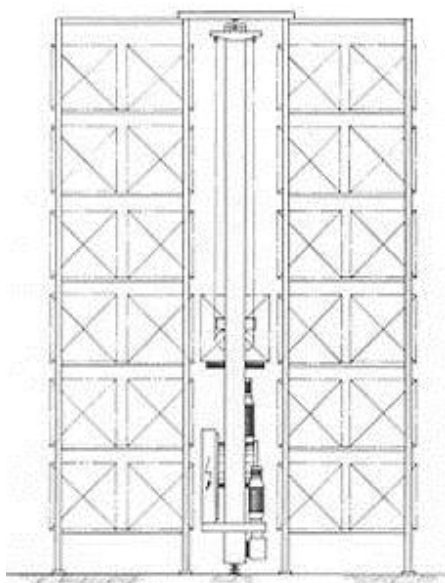
Prvi korak u oblikovanju automatiziranog visokoregalnog skladišta je utvrđivanje ciljeva planiranja, projektiranja i gradnje ovakvog sustava. Neki od opravdanih ciljeva su poboljšanje kontrole robe, smanjenje inventara, poboljšanje produktivnosti, uklanjanje pretjeranog rukovanja materijalom, povećanje kapaciteta (postojećeg) podnog prostora, poboljšanje upotrebe skladišta ili nekretnine, gradnja postrojenja za rast poslovanja, smanjenje gubitaka zbog oštećenja, krađe ili zagubljene robe, poboljšanje sigurnosti radne okoline ili štednja energije. Ovdje nisu obuhvaćeni svi ciljevi, no dobra su podloga za generiranje drugih.

#### 4.1.2. Varijacije izvedbi

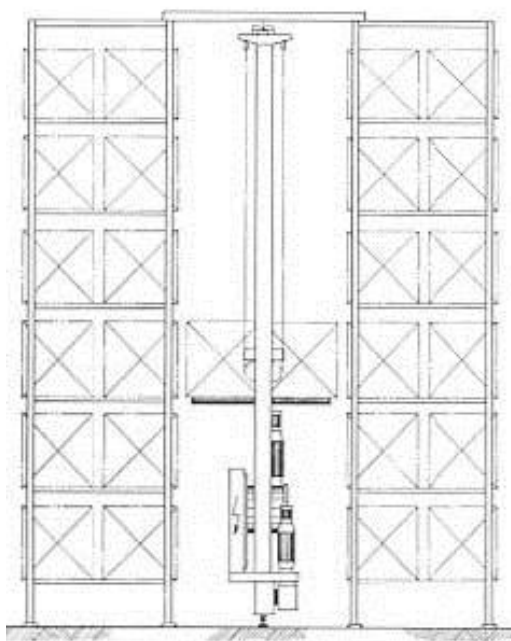
Postoje različite varijacije izvedbi automatiziranih visokoregalnih skladišta koje se mogu kombinirati da bi se zadovoljili neki od ciljeva planiranja i projektiranja sustava. Osnovni oblik gdje su prolaz i regal jednostruke širine dopušta pristup teretu s obje strane regala, no ukoliko postoji zahtjev za većim kapacitetom postoji opcija s regalom dvostruke širine. Isto tako, moguće je i povećanje širine prolaza.



**Slika 4. Prolaz jednostruke širine – Regal jednostruke širine**  
(eng. Single wide aisle – Single deep rack)

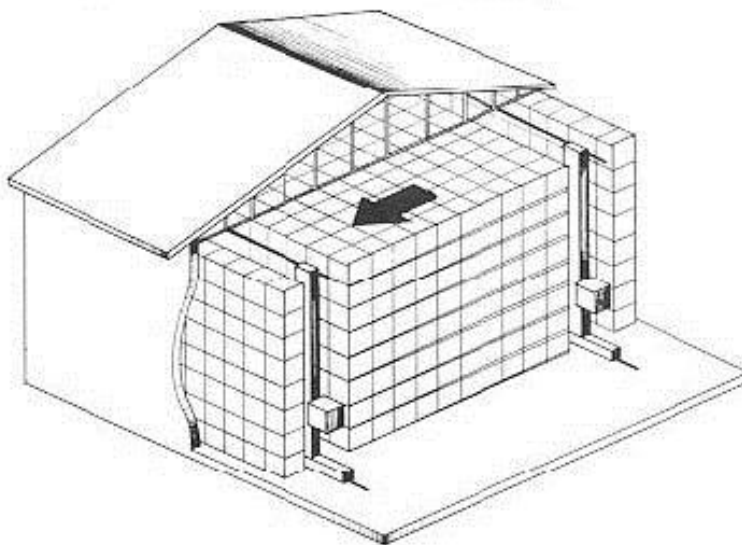


**Slika 5. Prolaz jednostruke širine – Regal dvostruke dubine**  
(eng. Single wide aisle – Double deep rack)



**Slika 6. Prolaz dvostruke širine – Regal dvostruke dubine**  
(eng. Double wide aisle – Double deep rack)

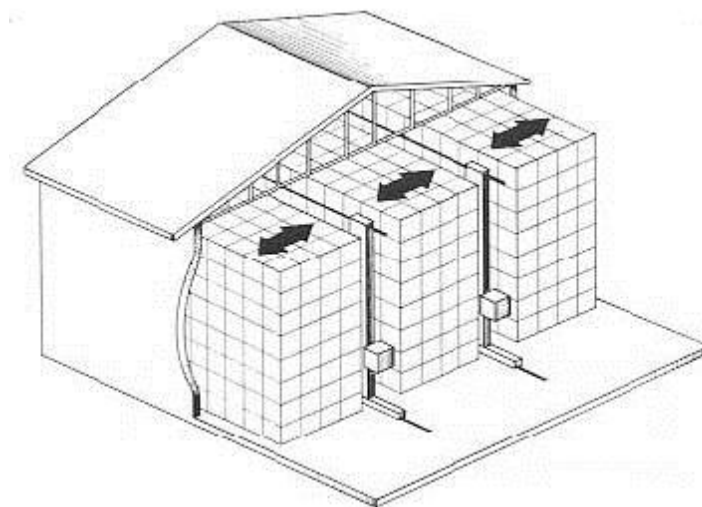
Izvedba slična automatiziranom visokoregalnom skladištu je regal s protočnom trakom naziva se još i automatizirano visokoregalno skladište za izuzimanje. Dvije dizalice opslužuju regal na način da jedna služi za skladištenje, a druga za izuzimanje. Teret se odlaže na protočnu traku, te se uslijed sile gravitacije spušta do strane na kojoj se vrši izuzimanje.



**Slika 7. Regal s protočnom trakom**  
(eng. Deep lane with flow rack)

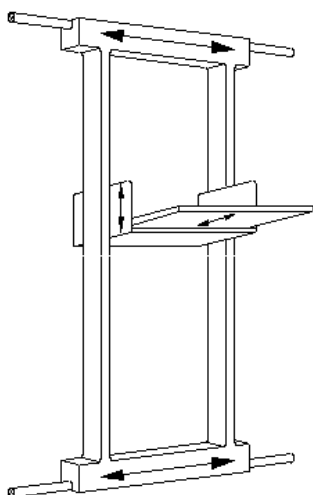


Regali s dubokim trakama koriste vozilo na dizalici koje ulazi u duboku traku gdje izuzima ili odlaže teret.



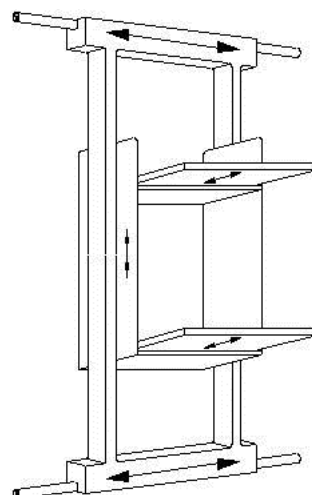
**Slika 8. Duboka traka s vozilom na dizalici**  
(eng. Deep lane with shuttle car)

Dizalice mogu imati više prihvatnih stanica, no najčešće se koriste s jednom, dvije ili tri. Dizalica s jednom prihvatnom stanicom može napraviti samo jednostruki ili dvostruki ciklus, dok dizalice s višestrukim prihvatnim stanicama mogu napraviti čak i šesterostruki ciklus što je više objašnjeno u poglavlju 4.2.3



**Slika 9. Dizalica s jednostrukom prihvatnom stanicom**

(eng. Single-shuttle S/R machine)



**Slika 10. Dizalica s višestrukom prihvatnom stanicom**

(eng. Multi-shuttle S/R machine)



---

## **4.2. Projektiranje sustava**

Projektiranje sustava je proces analize potreba i razvoj rješenja za zadovoljavanje definiranih ciljeva. Pritom je važno da su od samog početka uključeni i ljudi koji će koristiti, rukovati i održavati sustav. U analizu zahtjeva potrebno je definirati način za rukovanje teretom, kapacitet sustava i protok materijala. Uključiti arhitektonska ograničenja i planove za buduće širenje sustava.

Prilikom definiranja načina rukovanja potrebno je uzeti u obzir rukovanje teretom unutar i izvan sustava. Vanjske mjere i težina tereta važne su karakteristike za dizalicu, dimenzije skladišne lokacije i konvejera za transport od ulazno izlazne stanice do mjesta komisioniranja. Obično se preporuča korištenje opreme za oblikovanje tereta opisane u poglavlju 4.2.2. Određivanje kapaciteta sustava mora zadovoljiti trenutne zahtjeve ali i planove za budućnost. Protok materijala utječe na kapacitet sustava te je potrebno definirati prosječne i vršne stope prometa, a osim toga treba uzeti u obzir i zastoje, redove i zakrčenost sustava.

Na koncu, vrlo je bitno odrediti trajanje radnog ciklusa dizalice kako bi se lakše procijenilo zadovoljava li sustav određenim zahtjevima za propusnost u odnosu na dimenzije.

### **4.2.1. Osnovni dijelovi**

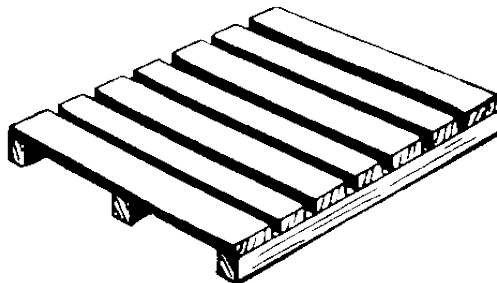
Osnovne komponente ovog sustava su; visoki regali, dizalica ili transportni uređaj za posluživanje regala, vozna staza, ulazno/izlazna stanica ili primopredajno područje, konvejeri, okretni stolovi, informacijska stanica i protupožarni sustav.

Dizalica se nalazi na voznoj stazi na podu i putuje niz prolaz. Sastoji se od jarbola (eng. mast) ili okvira na koji je pričvršćen lift (eng. carriage) koji služi za dizanje ili spuštanje tereta na razinu gdje želimo odložiti ili izuzeti teret. Jedan ili više uređaja za skladištenje, prihvatne stanice (eng. shuttle), spojene su na lift kako bi se manipuliralo paletom ili teretom.

### **4.2.2. Oprema za oblikovanje tereta**

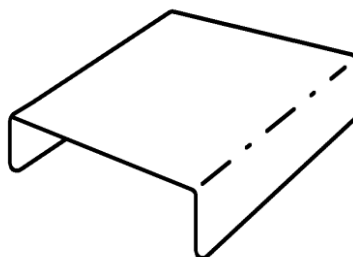
Ukoliko materijal dopušta moguće je rukovanje teretom bez opreme, no radi zaštite i sigurnosti preporuča se skladištenje robe na opremu za oblikovanje tereta kao što su palete, klizači, bačve, sanduci ili klizne ploče. U nastavku su opisani osnovni oblici opreme.

**Paleta** su platforme s razmakom između gornje i donje površine gdje ulaze vilice dizalice za podizanje tereta. Najčešće su drveni ili metalni, no mogu biti i plastični, kartonski ili gumeni. U Europi se koriste takozvane „Euro-Paleta“ čije su dimenzije obično 800x1200 mm.



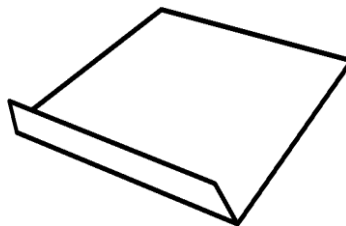
Slika 11. Skica palete

**Klizači** (eng. Skids) su metalne platforme s velikim razmakom ispod gornje površine, koje omogućuju ručnim teretnim kolicima prijevoz materijala i robe. U odnosu na palete, klizači se koriste za teže terete i kad slaganje materijala nije potrebno.



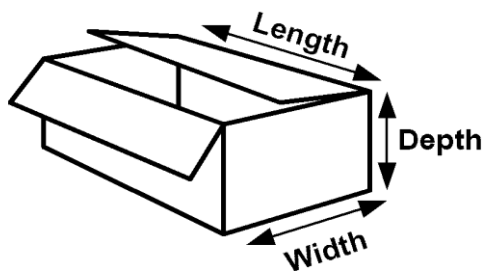
Slika 12. Skica klizača

**Klizna ploča** (eng. Slipsheet) je deblji komad kartona ili plastike na koji se odlaže teret, a rukuje se pomoću viličara koji pomoću posebnih vilica povlači ili gura teret za dio koji viri. Koristi se pri transportu jer smanjuje dimenzije i težinu tereta, no u odnosu na palete veće su šanse za oštećivanje tereta.



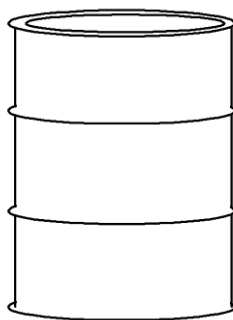
Slika 13. Skica klizača

**Kartonske kutije** služe za odlaganje, zaštitu pojedinačnih dijelova. Koriste se za distribuciju i rukovanje robe.



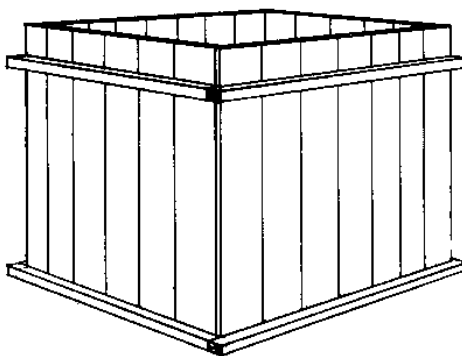
Slika 14. Skica kartonske kutije

**Bačve** služe za odlaganje, zaštitu pojedinačnih dijelova. Koriste se za distribuciju i rukovanje robe.



Slika 15. Skica bačve

**Sanduci** služe za odlaganje, zaštitu pojedinačnih dijelova. Koriste se za distribuciju i rukovanje robe.



Slika 16. Skica sanduka

#### 4.2.3. Određivanje radnih ciklusa

Za oblikovanje automatiziranih visokoregalnih skladišta potrebno je izračunati radne cikluse dizalice. Svrha je minimizirati broj prolaza ( $M$ ) uz zadana ograničenja, protok ( $q$ ) i kapacitet ( $Q$ ) sustava.

Osnovni algoritam za izračunavanje po koracima:

**Korak 1.**  $M=0$

**Korak 2.**  $M=M+1$

**Korak 3.** Za traženi kapacitet ( $Q$ ) i zadani broj prolaza ( $M$ ) izračunaj vrijeme ciklusa ( $t_c$ )

**Korak 4.** Ako je  $\frac{1}{t_c} < \frac{Q}{M}$  vrati se na korak 2., u suprotnom ZAVRŠI

Za izračunavanje radnih ciklusa koristi se nekoliko modela. U ovom radu prikazani su MHI, FEM 9.851 i Bozer/White model. Model MHI u obzir uzima vrijeme vožnje do prve lokacije koja se nalazi na polovici dužine i visine, odnosno u centru regala, i drugu lokaciju koja je na 3/4 dužine i 3/4 visine regala. Model FEM 9.851 računa vrijeme vožnje do lokacija koje se nalaze na 2/3 visine i 1/5 duljine regala i druga na 1/5 visine i 2/3 duljine regala. Model Bozer/White vrijeme radnog ciklusa računa se prema danoj formuli, a lokacije su slučajno odabrane.

Radni ciklusi automatiziranih visokoregalnih skladišta mogu biti jednostavni i složeni. Kod jednostavnog ciklusa dizalica obavlja samo jednu radnju (odlaganje ili izuzimanje), pa se kod dizalice s jednostrukom prihvatnom stanicom naziva još i jednostruki ciklus. Radi bolje iskoristivosti sustava teži se složenim radnim ciklusima u kojima dizalica s jednostrukom prihvatnom stanicom obavlja dvije radnje, odlaganje i izuzimanje, što nazivamo dvostruki ciklus.

**Tablica 1. Pregled radnih ciklusa**

	Dizalica s jednostrukom prihvatnom stanicom	Dizalica s dvostrukom prihvatnom stanicom	Dizalica s trostrukom prihvatnom stanicom
<b>Jednostavni ciklus</b>	Jednostruki ciklus	Dvostruki ciklus	Trostruki ciklus
<b>Složeni ciklus</b>	Dvostruki ciklus	Četverostruki ciklus	Šesterostruki ciklus

---

#### **4.2.4. Određivanje redoslijeda odlaganja i izuzimanja**

Svi operativni postupci pri projektiranju sustava usmjereni su na povećanje protoka sustava. Jedan od načina smanjenja vremena radnog ciklusa dizalice je određivanje redoslijeda skladištenja i izuzimanja.

Zbog toga razvijani su automatizirani visokoregalni sustavi s višestrukom prihvatnom stanicom (eng. multi-shuttle). Dizalica s jednostrukom prihvatnom stanicom (eng. single-shuttle) može obaviti maksimalno jedno odlaganje i jedno izuzimanje u složenom ciklusu što se naziva dvostruki ciklus (eng. dual command), dok dizalica s dvostrukom prihvatnom stanicom (eng. twin-shuttle) u tom istom može obaviti dva izuzimanja i dva odlaganja, odnosno četverostruki ciklus (eng. quadruple command). U praksi su izvedeni sustavi s tri prihvatne stanice na dizalici (eng. triple-shuttle) koje mogu obaviti do tri odlaganja i tri izuzimanja po ciklusu, čiji složeni ciklus nazivamo šesterostrukim ciklusom (eng. sextuple command).

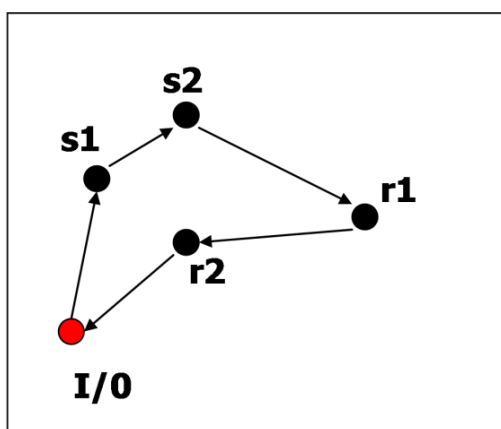
Postoji nekoliko pravila za skladištenje i izuzimanje kod automatiziranih visokoregalnih skladišta s višestrukom prihvatnom stanicom, a u nastavku objašnjene su dvije koje se koriste u softverskom paketu ExASRS v2.0.

### Pravilo „prvi ulazi – prvi izlazi“

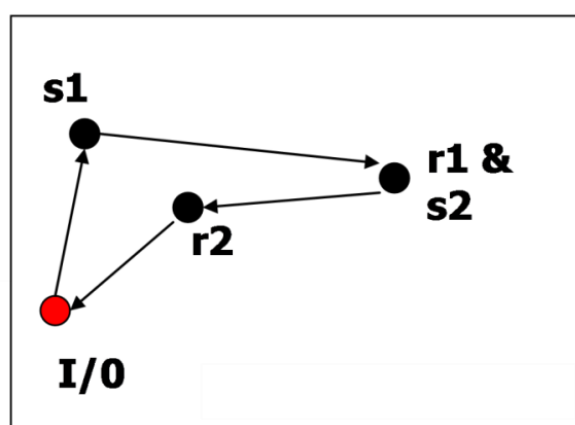
(eng. First Come - First Serve, FCFS)

Odlaganje i izuzimanje prema pravilu FCFS obrađuje zahtjeve točno prema redoslijedu po kojem su zaprimljeni.

Primjerice, dizalica s dvostrukom prihvatnom stanicom mora uskladištiti dva tereta ( $S_1$  i  $S_2$ ) i izuzeti dva tereta ( $R_1$  i  $R_2$ ). Dizalica putuje do prve lokacije gdje odlaže teret  $S_1$ , zatim putuje do iduće lokacije gdje odlaže teret  $S_2$ . Nakon toga putuje do treće lokacije gdje izuzima teret  $R_1$ , na koncu putuje do posljednje, četvrte, lokacije gdje izuzima teret  $R_2$  i vraća se na U/I stanicu.



Slika 17. „Prvi ulazi -prvi izlazi“ redoslijed ciklusa



Slika 18. Modificirani „Prvi ulazi -prvi izlazi“ redoslijed ciklusa

Modificirano FCFS pravilo obavlja skladištenje robe na onoj lokaciji gdje je prethodno izuzeto i time eliminira vrijeme putovanja između lokacija.

Na primjer, dizalica s dvostrukom prihvatnom stanicom mora uskladištiti dva tereta ( $S_1$  i  $S_2$ ) i izuzeti dva tereta ( $R_1$  i  $R_2$ ). Dizalica putuje do prve lokacije gdje skladišti teret  $S_1$ , zatim putuje do iduće lokacije gdje izuzima teret  $R_1$  i pohranjuje teret  $S_2$  na istu lokaciju. Na kraju putuje do treće lokacije gdje izuzima teret  $R_2$  i vraća se na U/I stanicu. Modificiranim pravilom eliminirali smo jedan dio puta obzirom da je teret  $R_1$  izuzet s iste lokacije u na kojoj je pohranjen teret  $S_2$ . Dizalica s trostrukom prihvatnom stanicom i ovakvim načinom izuzimanja i odlaganja može eliminirati čak dva vremena vožnje između lokacija.

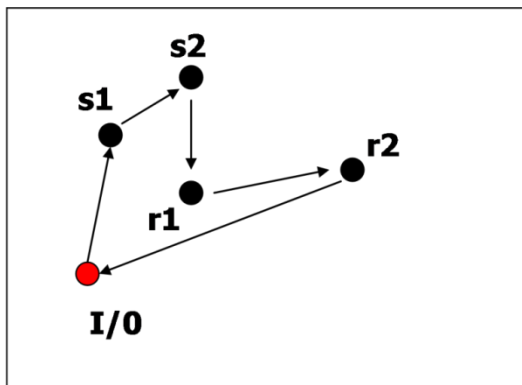
Simulacijama je utvrđeno da je ovakav modificirani četverostruki ciklus 17% kraći od osnovnog, odnosno 34% kraći od dvostrukog ciklusa s dizalicom s jednostrukom prihvatnom stanicom. Modificirani šesterostruki ciklus je 25% kraći od osnovnog, odnosno čak 49% kraći od dvostrukog ciklusa s dizalicom s jednostrukom prihvatnom stanicom.

## Pravilo „najbližeg susjeda“

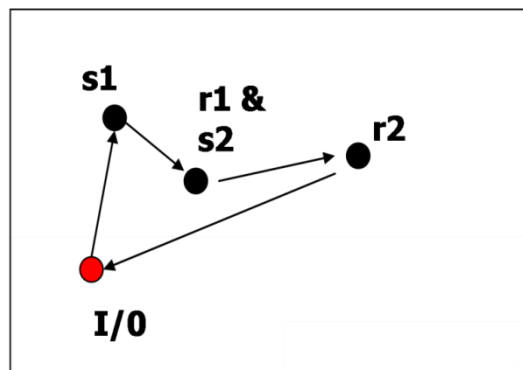
(eng. Nearest neighbor, NN)

Kod NN pravila sustav odabire iduću najbližu lokaciju te tako umanjuje udaljenost odnosno vrijeme putovanja

Primjerice, dizalica s dvostrukom prihvatnom stanicom mora uskladištiti dva tereta ( $S_1$  i  $S_2$ ) i izuzeti dva tereta ( $R_1$  i  $R_2$ ). Dizalica putuje do prve lokacije gdje odlaže teret  $S_1$ , zatim putuje do iduće najbliže lokacije gdje odlaže teret  $S_2$ . Nakon toga putuje do treće najbliže lokacije gdje izuzima teret  $R_1$ , te na koncu putuje do posljednje lokacije gdje izuzima teret  $R_2$  i vraća se na U/I stanicu



Slika 19. „Najbliži susjed“ redoslijed ciklusa



Slika 20. Modificirani "najbliži susjed" redoslijed ciklusa

Modificirano NN pravilo obavlja skladištenje na istu lokaciju na kojoj je izuzimanje smanjujući time vrijeme putovanja između lokacija.

Na primjer, dizalica s dvostrukom prihvatnom stanicom mora uskladištiti dva tereta ( $S_1$  i  $S_2$ ) i izuzeti dva tereta ( $R_1$  i  $R_2$ ). Dizalica putuje do prve lokacije gdje skladišti teret  $S_1$ , zatim putuje do iduće najbliže lokacije za izuzimanje gdje izuzima teret  $R_1$  i pohranjuje teret  $S_2$ . Na kraju putuje do treće lokacije gdje izuzima teret  $R_2$  i vraća se na U/I stanicu. Modificiranim pravilom eliminirali smo jedan dio puta obzirom da je teret  $R_1$  izuzet s iste lokacije u na kojoj je pohranjen teret  $S_2$ . Dizalica s trostrukom prihvatnom stanicom i ovakvim načinom izuzimanja i odlaganja može eliminirati čak dva vremena vožnje između lokacija.

## 5. MODELI ODREĐIVANJA RADNIH CIKLUSA DIZALICE AUTOMATIZIRANOG VISOKOREGALNOG SKLADIŠTA

### 5.1. Model MHI

Organizacija MHIA<sup>3</sup> razvila je jednostavni model za izračunavanje radnog ciklusa automatiziranog visokoregalnog skladišta. Koristi se za izračunavanje jednostavnog i složenog (jednostrukog i dvostrukog) ciklusa kod dizalice s jednostrukom prihvatnom stanicom, a rezultati su najtočniji kad je omjer dužine i visine regala jednak omjeru horizontalne i vertikalne brzine dizalice. Rezultati su korisni u preliminarnom projektiranju sustava i mogu se koristiti kao referentna točka za ocjenu performanse dizalice.

Neke od pretpostavki za ovaj model su:

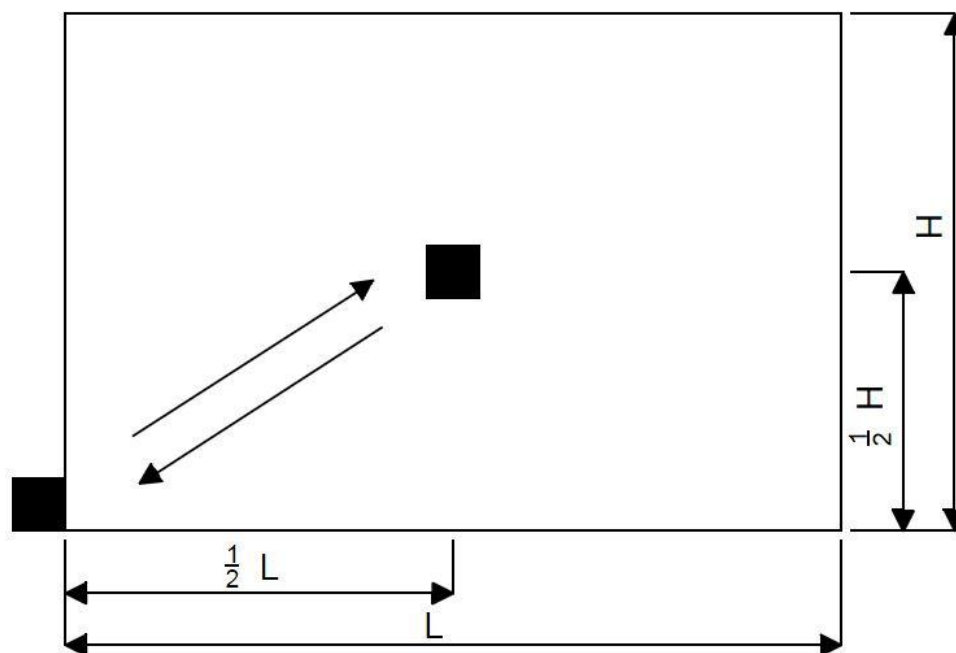
- Regal je pravokutnog oblika, a U/I stanica se nalazi u donjem lijevom kutu regala
- Dizalica obavlja jednostruki ili dvostruki ciklus
- Poznate su duljina i visina regala, te vertikalna i horizontalna brzina dizalice
- Prva lokacija za skladištenje ili izuzimanje nalazi se u sredini regala, odnosno na polovici dužine i visine
- Druga lokacija za izuzimanje ili skladištenje nalazi se na 3/4 duljine i 3/4 visine regala

---

<sup>3</sup>MHIA (Material Handling Industry of America) – Američka industrija za rukovanje materijalom



### 5.1.1. Jednostruka prihvatna stanica s jednostrukim ciklusom



**Slika 21. Metoda izračunavanja jednostrukog radnog ciklusa MHI modelom**

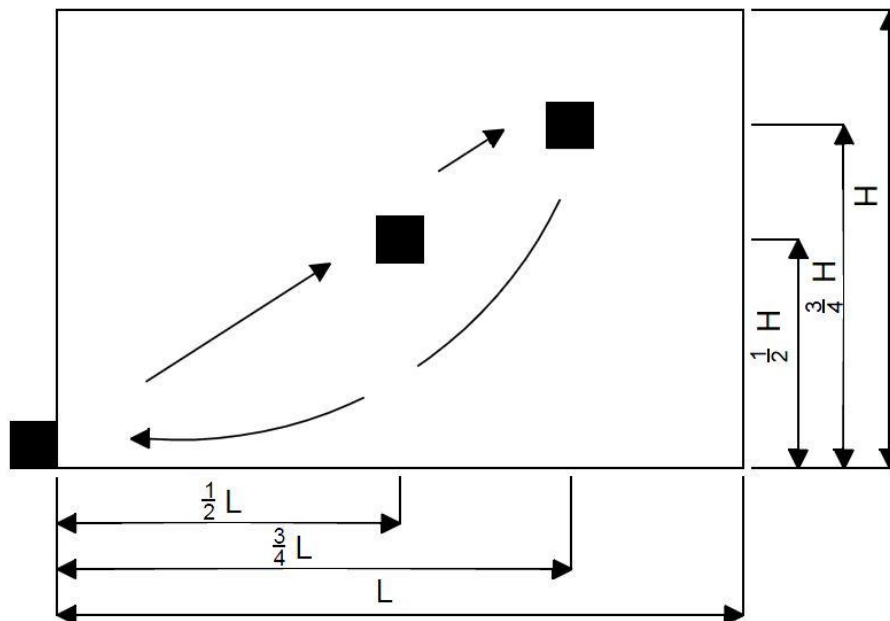
Računa se vrijeme vožnje do lokacije za skladištenje tereta na polovici dužine i polovici visine regala

$$t_{v01} = \max \left\{ \frac{\frac{L}{2}}{v_x}, \frac{\frac{H}{2}}{v_y} \right\} \quad (1)$$

Ukupno vrijeme jednostavnog ciklusa dobije se sumom svih dobivenih vremena i vremenima za utovar i istovar tereta.

$$t_{jc} = 2t_{v01} + 2t_k \quad (2)$$

### 5.1.2. Jednostruka prihvatna stanica s dvostrukim ciklusom



**Slika 22. Metoda izračunavanja dvostrukog radnog ciklusa MHI modelom**

Računa se vrijeme vožnje do lokacije za skladištenje tereta na polovici dužine i polovici visine regala prema jednadžbi (1).

Računa se vrijeme vožnje do prethodne lokacije za skladištenje tereta do iduće lokacije za izuzimanje tereta koja je na 3/4 dužine i 3/4 visine regala.

$$t_{v12} = \max \left\{ \frac{\frac{L}{2}}{v_x}, \frac{\frac{H}{2}}{v_y} \right\} \quad (3)$$

Računa se vrijeme povratka od lokacije izuzimanja tereta do U/I stanice.

$$t_{v20} = \max \left\{ \frac{\frac{3L}{4}}{v_x}, \frac{\frac{3H}{4}}{v_y} \right\} \quad (4)$$

Ukupno vrijeme složenog ciklusa dobije se sumom dobivenih vremena vožnje iz jednadžbi (1), (3), (4) i vremenima za utovar i istovar tereta.

$$t_{dc} = t_{v01} + t_{v12} + t_{v20} + 4t_k \quad (5)$$

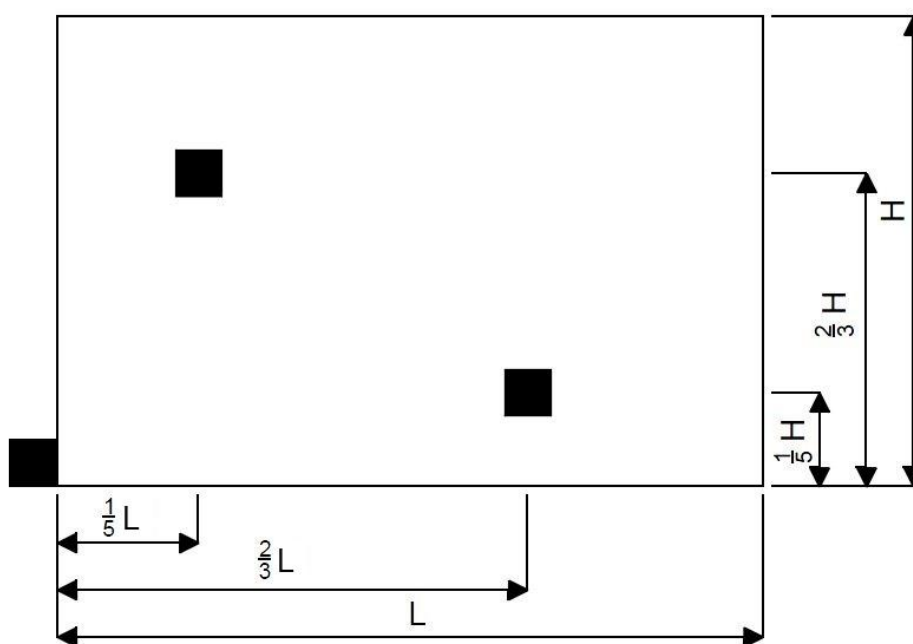
## 5.2. Model FEM 9.851

Europska Federacija za rukovanje materijalom<sup>4</sup> razvila je još jedan jednostavan model proračuna radnih ciklusa. Koristi se za izračunavanje jednostavnog i složenog (jednostrukog i dvostrukog) ciklusa za dizalicu s jednostrukom prihvatnom stanicom, a rezultati su korisni u preliminarnom projektiranju sustava i mogu se koristiti kao referentna točka za ocjenu performanse dizalice.

Neke od pretpostavki za ovaj model su:

- Regal je pravokutnog oblika, a U/I stanica se nalazi u donjem lijevom kutu regala
- Dizalica obavlja jednostruki ili dvostruki ciklus
- Poznate su duljina i visina regala, te vertikalna i horizontalna brzina dizalice
- Prva lokacija za skladištenje ili izuzimanje nalazi se na  $\frac{1}{5}$  duljine i  $\frac{2}{3}$  visine regala
- Druga lokacija za izuzimanje ili skladištenje nalazi se na  $\frac{2}{3}$  duljine i  $\frac{1}{5}$  visine regala

Specifičnost ovog modela je što se prilikom izračunavanja jednostrukog ciklusa uzima prosječna vrijednost vremena vožnji za te dvije lokacije.



Slika 23. FEM model

<sup>4</sup>FEM (European Federation of Materials Handling)

### 5.2.1. Jednostruka prihvatna stanica s jednostrukim ciklusom

Računa se vrijeme vožnje do lokacije za skladištenje tereta na 1/5 dužine i 2/3 visine regala.

$$t_{v01} = \max \left\{ \frac{L}{5}, \frac{2H}{3} \right\} \quad (6)$$

Računa se vrijeme vožnje do lokacije za skladištenje tereta na 2/3 dužine i 1/5 visine regala.

$$t_{v20} = \max \left\{ \frac{2L}{3}, \frac{H}{5} \right\} \quad (7)$$

Računaju se vremena ciklusa za dobivena vremena vožnje iz jednadžbi (6) i (7).

$$t_{c01} = 2t_{v01} + 2t_k \quad (8)$$

$$t_{c20} = 2t_{v20} + 2t_k \quad (9)$$

Računa se prosječno vrijeme trajanja jednostavnog ciklusa za dobivena vremena ciklusa jednadžbi (8) i (9).

$$t_{jc} = \text{avg}\{t_{c01}, t_{c20}\} \quad (10)$$

### 5.2.2. Jednostruka prihvatna stanica s dvostrukim ciklusom

Računa se vrijeme vožnje do lokacija za skladištenje tereta na 1/5 dužine i 2/3 visine regala i druga na 2/3 dužine i 1/5 visine regala prema jednadžbama (6) i (7).

Računa se vrijeme vožnje između dviju navedenih lokacija.

$$t_{v12} = \max \left\{ \frac{14L}{30}, \frac{14H}{30} \right\} \quad (11)$$

Ukupno vrijeme složenog ciklusa dobije se sumom dobivenih vremena vožnje iz jednadžbi (6), (7) i (11) i vremenima za utovar i istovar tereta.

$$t_{dc} = t_{v01} + t_{v12} + t_{v20} + 4t_k \quad (12)$$

### 5.3. Model Bozer/White

Vrijeme radnog ciklusa automatiziranog visokoregalnog skladišta može se izračunati i pomoću modela koji su razvili Yavuz A. Bozer i John A. White prema kojima je dobio ime.

Model su razvijali pod sljedećim pretpostavkama:

- Smatra se da je regal pravokutnog oblika, a U/I stanica je u donjem lijevom kutu
- Dizalica obavlja jednostruki ili dvostruki ciklus
- Poznate su duljina i visina regala te vertikalna i horizontalna brzina dizalice
- Dizalica putuje simultano u horizontalnom i vertikalnom smjeru, a u izračunu se koriste konstantne horizontalne i vertikalne brzine
- Lokacija je slučajno odabrana, odnosno, može se koristiti za skladištenje i izuzimanje
- Vrijeme skladištenja i izuzimanja je zanemareno zbog toga što ono ne utječe na oblik regala i brzinu putovanja dizalice.

Prema definiciji  $t_h = \frac{L}{v_h}$ , odnosno  $t_v = \frac{H}{v_v}$ , autori uvode varijable  $t_h$  i  $t_v$  koje predstavljaju vrijeme potrebno da dizalica dođe od U/I stanica, locirane u donjem lijevom kutu, do najudaljenije horizontalne i vertikalne lokacije. Između dvije varijable bira se ona s najvećom vrijednošću i postaje  $T$ , odnosno faktor mjera.

$$T = \max \left\{ \frac{L}{v_x}, \frac{H}{v_y} \right\} \quad (13)$$

Osim toga, uvodi se i faktor oblika  $b$ , koji mora biti  $0 \leq b \leq 1$ . Ukoliko su dimenzije regala i brzine dizalice takve da je  $t_h = t_v$ , tada je oblik regala „SIT“, a  $b = 1$ .

$$b = \min \left\{ \frac{L}{v_x \cdot T}, \frac{H}{v_y \cdot T} \right\} \quad (14)$$

#### 5.3.1. Jednostruka prihvatna stanica s jednostrukim ciklusom

Prema danoj formuli za jednostavni ciklus:

$$t_{jc} = \left[ 1 + \frac{b^2}{3} \right] \cdot T + 2 \cdot t_k \quad (15)$$

Ili računanjem vremena vožnje dizalice:

$$t_v = 2 \cdot E[t_{x,y}] \quad (16)$$

te sumom vremena voženje i vremena utovara odnosno istovara:

$$t_{jc} = t_v + 2 \cdot t_k \quad (17)$$

### 5.3.2. Jednostruka prihvatna stanica s dvostrukim ciklusom

Prema danoj formuli za složeni ciklus:

$$t_{sc} = \frac{1}{30} [40 + 15 \cdot b^2 - b^3] \cdot T + 4 \cdot t_k \quad (18)$$

ili računanjem vremena voženje dizalice i izmjene među lokacijama:

$$t_v = 2 \cdot E[t_{x,y}] \quad (19)$$

$$t_{izm} = \frac{1}{30} [10 + 5 \cdot b^2 + b^3] \cdot T \quad (20)$$

te sumom vremena voženje, izmjene među lokacijama i vremena utovara odnosno istovara:

$$t_{dc} = t_v + t_{izm} + 4 \cdot t_k \quad (21)$$

### 5.4. Model Chang/Wen/Lin

(eng. single shuttle ASRS with acceleration/deceleration)

Ovaj model je kombinacija Bozer/White modela i metoda za proračun vremena vožnje s uključenom promjenom brzine prema Chang, Wen i Linu te Hwang i Leeu.

Izračunaju se normalizirana vremena vožnje prema Bozer/White modelu koji nema uključenu promjenu brzine za jednostruki i dvostruki radni ciklus te vrijeme voženje između lokacija.

$$e_{jc} = 1 + \frac{b^3}{3} \quad (22)$$

$$e_{izm} = \frac{1}{3} + \frac{b^2}{6} - \frac{b^3}{30} \quad (23)$$

$$e_{dc} = \frac{4}{3} + \frac{b^2}{2} - \frac{b^3}{30} \quad (24)$$

Prema metodi Hwang i Leea izračuna se teoretsko vrijeme za putovanje do polovice visine i dužine regala umjesto korištenja stvarnih vremena.

Vremena putovanja do polovice duljine regala,  $t_x$ , uključujući ubrzanje i usporenje gdje je  $a_h$  horizontalna promjena brzine su:

$$t_x = \frac{L}{2 \cdot v_x} + \frac{v_x}{a_x} \quad \text{za} \quad \frac{L}{2} \geq \frac{v_x^2}{a_x} \quad (25)$$

$$t_x = \sqrt{\frac{4 \cdot L}{2 \cdot a_x}} \quad \text{za} \quad \frac{L}{2} < \frac{v_x^2}{a_x} \quad (26)$$

Vremena putovanja do polovice visine regala,  $t_y$ , uključujući ubrzanje i usporenje gdje je  $a_v$  vertikalna promjena brzine su:

$$t_y = \frac{H}{2 \cdot v_y} + \frac{v_y}{a_y} \quad \text{za} \quad \frac{H}{2} \geq \frac{v_y^2}{a_y} \quad (27)$$

$$t_y = \sqrt{\frac{4 \cdot H}{2 \cdot a_y}} \quad \text{za} \quad \frac{H}{2} < \frac{v_y^2}{a_y} \quad (28)$$

Proračun normaliziranih vremena putovanja uključujući promjenu brzine za jednostruki ciklus i vrijeme vožnje između skladišnih lokacija prema metodi Chang, Wen i Lina:

$$e'_{jc} = 2 \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + 1} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1 + 1} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + 1} \right) \cdot b^{\lambda_1 + 1} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} e'_{izm} = & \left( 1 - \frac{2}{\lambda_1 + 1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1 + 1} \right) \\ & + \left( \frac{2}{\lambda_1 + 1} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + 1} + \frac{1}{\lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 + 1} \right) b^{\lambda_1 + 1} \\ & + \left( \frac{2}{2 \cdot \lambda_1 + \lambda_2 + 1} - \frac{1}{2 \cdot \lambda_1 + 2 \cdot \lambda_2 + 1} \right. \\ & \left. + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2 + 1} \right) b^{2 \cdot \lambda_1 + 1} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\text{gdje je } \lambda_1 = \frac{1}{\beta_1} \text{ i } \lambda_2 = \frac{1}{\beta_1} \quad (31) \quad (32)$$

$$\beta_1 = \frac{\ln t_x - \ln t_h}{\ln 0,5} \quad \text{i} \quad \beta_2 = \frac{\ln t_y - \ln t_v}{\ln 0,5} \quad \text{za} \quad t_h \geq t_v \quad (33) \quad (34)$$

$$\beta_1 = \frac{\ln t_y - \ln t_v}{\ln 0,5} \quad \text{i} \quad \beta_2 = \frac{\ln t_x - \ln t_h}{\ln 0,5} \quad \text{za} \quad t_h < t_v \quad (35) \quad (36)$$

Proračun normaliziranih konstanti s promjenom brzine u jednostrukom ciklusu ( $k_{jc}$ ) i vremenu vožnje između lokacija ( $k_{izm}$ ):

$$k_{jc} = e'_{jc} - e_{jc} \quad (37)$$

$$k_{izm} = e'_{izm} - e_{izm} \quad (38)$$

Vrijeme jednostavnog i složenog radnog ciklusa izračuna iz normaliziranih vremena radnih ciklusa (jednadžbe (22), (23) i (24)) i normaliziranih konstanti s promjenom brzine u jednostrukom ciklusu i vremenu vožnje između lokacija (jednadžbe (37) i (38)).

$$t_{jc} = T \cdot (e_{jc} + k_{jc}) + p + d \quad (39)$$

$$t_{dc} = T \cdot (e_{dc} + k_{jc} + k_{izm}) + 2 \cdot p + 2 \cdot d \quad (40)$$

gdje je  $p$  vrijeme izuzimanja tereta, a  $d$  vrijeme skladištenja tereta.

Množenjem s faktorom mjera,  $T$ , normalizirana vremena putovanja u gornjim izračunima dobivamo je procijenjeno prosječno vrijeme putovanja za  $L \times H$  veličinu regala.

Jednostruka prihvatna stanica može izvršiti jednostruki (skladištenje ili izuzimanje) ili dvostruki ili složeni (skladištenje i izuzimanje) ciklus. Stoga je prosječno trajanje ciklusa prosječno trajanje jednostrukih i dvostrukih vremena ciklusa. Za dizalicu s jednostrukom prihvatnom stanicom koristi se pravilo FCFS koje obrađuje zahtjeve prema zaprimljenom redoslijedu.

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu FCFS

$$= (100 - \%dual) \cdot (t_{jc}) + \left(\frac{t_{dc}}{2}\right) \cdot (\%dual) \quad (41)$$

### 5.5. Model za višestruku prihvatnu stanicu s promjenom brzine

(eng. multi shuttle with acceleration/deceleration)

Model proračuna vremena radnih ciklusa za višestruku prihvatnu stanicu s promjenom brzine obuhvaća model Bozer/White koji u obzir uzima trenutnu promjenu brzine gibanja i razmatranja Meller i Mungwattana, te metode Chang, Wen i Lina te Hwang i Leea koji u vrijeme vožnje dizalice uključuju ubrzanje i usporenje. Proračuni su podijeljeni prema pravilima skladištenja navedenim u poglavlju 4.2.4 za jednostavne i složene cikluse.

#### 5.5.1. FCFS pravilo

Izračun obrade skladištenja i izuzimanja prema pravilu FCFS sličan je prethodnom izračunu za dizalicu s jednostrukom prihvatnom stanicom. Međutim, sustav s dvije ili tri prihvatne stanice može odraditi dvije ili tri naredbe u jednostrukom ciklusu, no u dvostrukom ciklusu može odraditi četiri ili šest naredbi. Zbog toga je potrebno izračunati vrijeme dvostrukog ( $t_{dc}$ ) i četverostrukog ( $t_{qc}$ ) radnog ciklusa za dizalicu s dvije prihvatne stanice i vrijeme trostrukog ( $t_{tc}$ ) i šesterostrukog ( $t_{xc}$ ) radnog ciklusa za dizalicu s tri prihvatne stanice. Jednadžbe koje slijede modificirane su iz [6] i sadrže normalizirane konstante za vremena s promjenom brzine ( $k_{jc}$  i  $k_{izm}$ ).

Za sustav s **dvije** prihvatne stanice:

$$t_{dc} = T(e_{dc} + k_{jc} + k_{izm}) + 2p + 2d \quad (42)$$

$$t_{qc} = T(e_{qc} + k_{jc} + 3k_{izm}) + 4p + 4d \quad (43)$$

$$e_{qc} = e_{jc} + 3e_{izm} \quad (44)$$

Za sustav s **tri** prihvatne stanice:



$$t_{tc} = T(e_{tc} + k_{jc} + 2k_{izm}) + 3p + 3d \quad (45)$$

$$e_{tc} = e_{jc} + 2e_{izm} \quad (46)$$

$$t_{xc} = T(e_{xc} + k_{jc} + 5k_{izm}) + 6p + 6d \quad (47)$$

$$e_{xc} = e_{jc} + 5e_{izm} \quad (48)$$

Pretpostavkom da %dual označava postotak vremena kada sve prihvatne stanice rade dvostrukim ciklusom, a ostatak vremena (100-%dual) sve prihvatne stanice rade jednostrukim ciklusom. Zbog toga je prosječno vrijeme po zahtjevu za dizalice s dvostrukom i trostrukom prihvatnom stanicom po pravilu FCFS sljedeće:

Za sustav s **dvostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu FCFS

$$= (100 - \%dual) \cdot \left(\frac{t_{dc}}{2}\right) + \left(\frac{t_{qc}}{4}\right) \cdot (\%dual) \quad (49)$$

Za sustav s **trostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu FCFS

$$= (100 - \%dual) \cdot \left(\frac{t_{tc}}{3}\right) + \left(\frac{t_{qc}}{6}\right) \cdot (\%dual) \quad (50)$$

Gore navedeni izračun Prosječnog Vremena po Zahtjevu FCFS služi za određivanje odgovara li određen dizalica s višestrukom prihvatnom stanicom zahtjevu za propusnost sustava.

### 5.5.2. Modificirano FCFS pravilo

Modificirano FCFS pravilo skladišti teret na istu lokaciju iz koje izuzima teret eliminirajući time dio puta između lokacija. Potrebno je odrediti vrijeme modificiranog četverostrukog ciklusa ( $t_{mqc}$ ) za dizalicu s dvostrukom prihvatnom stanicom i vrijeme šesterostrukog ciklusa ( $t_{mxc}$ ) za dizalicu s trostrukom prihvatnom stanicom. Jednadžbe koje slijede modificirane su iz [6] i sadrže normalizirane konstante za vremena s promjenom brzine ( $k_{jc}$  i  $k_{izm}$ ).

Za sustav s **dvije** prihvatne stanice:

$$t_{mqc} = T(e_{mqc} + k_{jc} + 2k_{izm}) + 4p + 4d \quad (51)$$

$$\text{gdje je } e_{mqc} = e_{jc} + 2e_{izm} \quad (52)$$

Za sustav s **tri** prihvatne stanice:

$$t_{mxc} = T(e_{mxc} + k_{jc} + 3k_{izm}) + 6p + 6d \quad (53)$$

$$\text{gdje je } e_{mxc} = e_{jc} + 3e_{izm} \quad (54)$$

Prema tome je prosječno vrijeme po zahtjevu za dizalice s dvostrukom i trostrukom prihvatnom stanicom prema modificiranom FCFS (MFCFS) pravilu:

Za sustav s **dvostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu MFCFS

$$= (100 - \%dual) \cdot \left(\frac{t_{dc}}{2}\right) + \left(\frac{t_{mqc}}{4}\right) \cdot (\%dual) \quad (55)$$

Za sustav s **trostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu MFCFS

$$= (100 - \%dual) \cdot \left(\frac{t_{tc}}{3}\right) + \left(\frac{t_{mxc}}{6}\right) \cdot (\%dual) \quad (56)$$

### 5.5.3. NN pravilo

Ovo pravilo odabire iduću najbližu lokaciju. Potrebno je odrediti vrijeme dvostrukog ( $t_{dcNN}$ ) i četverostrukog ( $t_{qcNN}$ ) ciklusa za dizalicu s dvije prihvatne stanice, te trostrukog ( $t_{tcNN}$ ) i šesterostrukog ( $t_{xcNN}$ ) ciklusa za dizalicu s tri prihvatne stanice. Jednadžbe koje slijede modificirane su iz [6] i sadrže normalizirane konstante za vremena s promjenom brzine ( $k_{jc}$  i  $k_{izm}$ ).

Za sustav s **dvostrukom** prihvatnom stanicom:

$$t_{dcNN} = T(e_{dcNN} + k_{jc} + k_{izm}) + 2p + 2d \quad (57)$$

$$e_{dcNN} = 0,5[e_{SWm} + e_{TB(m-1)} + e_{SAq}] + 0,5[e_{jc} + e_{izm}] \quad (58)$$

$$t_{qcNN} = T(e_{qcNN} + k_{jc} + 3k_{izm}) + 4p + 4d \quad (59)$$

$$e_{qcNN} = e_{SWm} + e_{TB(m-1)} + e_{TB2} + e_{SAq} + e_{izm} \quad (60)$$

Za sustav s **trostrukom** prihvatnom stanicom:

$$t_{tcNN} = T(e_{tcNN} + k_{jc} + 2k_{izm}) + 3p + 3d \quad (61)$$

$$e_{tcNN} = 0,5[e_{SWm} + e_{TB(m-1)} + e_{TB(m-2)} + e_{SAs}] + 0,5[e_{jc} + 2e_{izm}] \quad (62)$$

$$t_{xcNN} = T(e_{xcNN} + k_{jc} + 5k_{izm}) + 6p + 6d \quad (63)$$

$$e_{xcNN} = e_{SWm} + e_{TB(m-1)} + e_{TB(m-2)} + e_{TB3} + e_{TB2} + e_{izm} + e_{SAs} \quad (64)$$

Prema tome je prosječno vrijeme po zahtjevu za dizalice s dvostrukom i trostrukom prihvatnom stanicom prema NN pravilu:

Za sustav s **dvostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu NN

$$= (100 - \%dual) \cdot \left( \frac{t_{dcNN}}{2} \right) + \left( \frac{t_{qcNN}}{4} \right) \cdot (\%dual) \quad (65)$$

Za sustav s **trostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu NN

$$= (100 - \%dual) \cdot \left( \frac{t_{tcNN}}{3} \right) + \left( \frac{t_{xcNN}}{6} \right) \cdot (\%dual) \quad (66)$$

#### 5.5.4. Modificirano NN pravilo

Modificirano NN pravilo (MNN) skladišti na istu lokaciju s koje je teret izuzet i time eliminira vrijeme putovanja između lokacija. Potrebno je izračunati vrijeme modificiranog četverostrukog NN ciklusa ( $t_{qcmNN}$ ) za dizalicu s dvostrukom prihvatnom stanicom i modificiranog šesterostrukog NN ciklusa ( $t_{xcmNN}$ ) za dizalicu s trostrukom prihvatnom stanicom.

Za sustav s **dvostrukom** prihvatnom stanicom:

$$t_{qcmNN} = T(e_{qcmNN} + k_{jc} + 2k_{izm}) + 4p + 4d \quad (67)$$

$$e_{qcmNN} = e_{SWm} + e_{TB2} + e_{izm} + e_{SAq} \quad (68)$$

Za sustav s **trostrukom** prihvatnom stanicom:

$$t_{xcmNN} = T(e_{xcmNN} + k_{jc} + 3k_{izm}) + 6p + 6d \quad (69)$$

$$e_{xcmNN} = e_{SWm} + e_{TB3} + e_{TB2} + e_{izm} + e_{SAs} \quad (70)$$

Prema tome je prosječno vrijeme po zahtjevu za dizalice s dvostrukom i trostrukom prihvatnom stanicom prema modificiranom NN pravilu:

Za sustav s **dvostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu mNN

$$= (100 - \%dual) \cdot \left( \frac{t_{dcNN}}{2} \right) + \left( \frac{t_{qcmNN}}{4} \right) \cdot (\%dual) \quad (71)$$

Za sustav s **trostrukom** prihvatnom stanicom:

Prosječno Vrijeme po Zahtjevu mNN

$$= (100 - \%dual) \cdot \left( \frac{t_{tcNN}}{3} \right) + \left( \frac{t_{xcmNN}}{6} \right) \cdot (\%dual) \quad (72)$$

## 6. SOFTVERSKI PAKET ExASRS v2.0

### 6.1. Općenito

ExASRS v2.0 je softverski alat izrađen u programskom paketu MS Office Excel koji služi za određivanje broja prolaza i veličine regala pri projektiranju automatiziranih visokoregalnih skladišta. Određuje najmanji mogući broj prolaza i dimenzije regala koje se mogu prilagoditi zadanim skladišnim kapacitetom i zahtjevom za propusnost sustava (broj skladištenja i izuzimanja po satu). Uz osnovne projektne specifikacije, izračunava i daje izvještaj o prosječnom vremenu po zahtjevu (u sekundama) za određeno skladište koristeći FCFS pravilo skladištenja i izuzimanja. Prosječnu propusnost (u satima) za određeno skladište, te prosječno vrijeme po zahtjevu (u sekundama) za nekoliko pravila skladištenja/izuzimanja. Pravilo „najbližeg susjeda“ (u nastavku teksta NN) i pravilo „prvi ulazi – prvi izlazi“ (u nastavku teksta FCFS), te njihove modifikacije. Osim toga, softver računa i vremena ciklusa za jednostruke i višestruke prihvatne stanice na dizalici, ovisno o zadanim parametrima.

Program je napravljen uz sljedeće pretpostavke:

- Ulazno/izlazna stanica smještena na početku svakog prolaza na najnižoj točki sustava
- Dizalica izvršava jednostruki ili dvostruki ciklus
- Dizalica putuje simultano u horizontalnom i vertikalnom smjeru
- Skladišne lokacije biraju se nasumično
- Poznato je vrijeme skladištenja i izuzimanja tereta
- Poznate su horizontalna i vertikalna ubrzanja i smanjenja brzine
- Poznat je postotak dvostrukog ciklusa
- Program koristi standardni Engleski sustav mjernih jedinica uključujući stope (feet) i inče (inch).

## 6.2. Algoritmi proračuna

Kao što je već objašnjeno ExASRS v2.0 određuje minimalni broj prolaza i veličine regala za automatizirano visokoregalno skladište koje odgovara zadanim specifikacijama u smislu maksimalnog skladišnog kapaciteta i zahtjevima propusnosti. Opća struktura algoritma prikazana je u nastavku gdje su  $v_h$  i  $v_v$  horizontalna i vertikalna brzina transportnog sredstva.

**Korak 1.**  $\#prolaza = 1$

**Korak 2.** Odredi veličinu regala ( $\#redova$  i  $\#stupaca$ ) da se zadovolji maksimalni zadani kapacitet

$$\#lokacija\ po\ regalu = \frac{\text{maksimalni kapacitet}}{2 \cdot (\#prolaza)}$$

AKO je zadana visina skladišta TADA

$$\#redova = \text{zadana visina redova}$$

$$\#stupaca = \frac{\#stupaca\ po\ regalu}{\#redova}$$

U PROTIVNOM AKO je square-in-time regal TADA

$$\#redova = \sqrt{\frac{\#lokacija\ po\ regalu}{\left(\frac{v_v}{v_h}\right)}}$$

$$\#stupaca = (\#redova) \cdot \frac{v_h}{v_v}$$

ZAVRŠI

**Korak 3.** Odredi prosječno vrijeme po zahtjevu prema pravilu FCFS za Korak 2. dimenzije regala (detaljnije u poglavlju 6.)

**Korak 4.** AKO je prosječno vrijeme po zahtjevu prema pravilu FCFS > zadanog vremena ciklusa

TADA

$$\#prolaza = \#prolaza + 1$$

vrati se na Korak 2.

U PROTIVNOM ZAVRŠI

Alat iterativno određuje najbolju konfiguraciju gdje u svakom koraku procjenjuje zadovoljava li odabrani broj prolaza zahtjev za zadani ukupni kapacitet i oblik regala (SIT ili zadana visina) dok nije zadovoljena zadana propusnost sustava. Ravnomjerno dijeli broj skladišnih lokacija među prolazima i određuje najmanju veličinu prolaza koja zadovoljava željeni

protok. Vrijeme ciklusa transportnog sredstva s jednostrukom prihvatnom stanicom u softveru izvodi se kombinacijom modela Bozer/White koji u obzir uzima trenutnu promjenu brzine gibanja i razmatranja Meller i Mungwattana, te model Chang/Wen/Lin koji u vrijeme vožnje dizalice uključuju ubrzanje i usporenje. Ukoliko potrebe nisu zadovoljene, broj prolaza povećava se za jedan i izračun počinje iz početka.

### 6.3. Ulazni parametri

#### 6.3.1. Unos

Prilikom otvaranja novog projekta, otvora se glavni list „ASRS Design & Analysis“ gdje je potrebno unijeti nekoliko parametara.

**Enter the following Information**

	Parameter	Value	
1	Number of Storage/Retrieval Shuttles		?
2	Number of Storage requests per hr		?
3	Number of Retrieval requests per hr		?
4	Maximum Storage Volume (units)		?
5	Storage Cell Height with clearances (ft)	Calculator	?
6	Storage Cell Width with clearances (ft)		?
7	S/R Machine Horizontal Velocity (ft/min)		?
8	S/R Machine Vertical Velocity (ft/min)		?
9	S/R Machine Horizontal accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )		?
10	S/R Machine Vertical accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )		?
11	Pickup Time (sec)		?
12	Deposit Time (sec)		?
13	% Dual Command Ops		?
14	Maximum Allowable Utilization (%)		?
15	Rack Shape	Square-In-Time(1)	?
16	Rack Type	Single Deep (1)	?

Reset

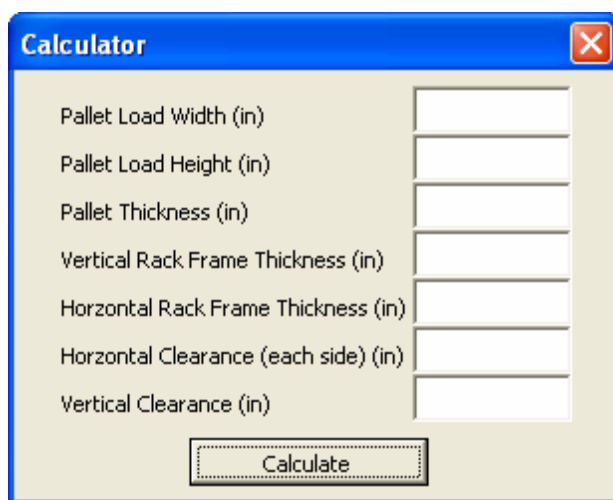
Solve

Sensitivity Analysis

Slika 24. Unos ulaznih parametara

- Broj prihvatnih stanica na dizalici** (eng. Number of Storage/Retrieval Shuttles) – možete unijeti broj 1, 2 ili 3 za odabrani broj prihvatnih stanica
- Broj zahtjeva za izuzimanje po satu** (eng. Number of Storage requests per hr) – ovdje unosite procijenjeni broj zahtjeva koje će dizalica obaviti u jednom satu

3. **Broj zahtjeva za skladištenje po satu** (eng. Number of Retrieval requests per hr) – ovdje unosite procijenjeni broj zahtjeva koje će dizalica obaviti u jednom satu
4. **Maksimalni kapacitet** (eng. Maximum Storage Volume)– maksimalni procijenjeni broj tereta koje će visokoregalno skladište uskladištiti u bilo kojem trenutku
5. **Visina ćelije** (eng. Storage Cell Height with clearances) – visina skladišne lokacije s uključenim razmacima u stopama
6. **Širina ćelije** (eng. Storage Cell Width with clearances) – širina skladišne lokacije s uključenim razmacima u stopama
  - a. Dostupan je i kalkulator za računanje visine i širine pritiskom na dugme „Calculator“



**Slika 25. Pomoćni kalkulator za izračun visine i širine skladišne lokacije**

- b. Popunjavanjem polja sa željenim dimenzijama regala te razmaka između regala i tereta, kalkulator izračuna potrebnu visinu i širinu i automatski ubaci dimenzije u za to predviđena polja na glavnom listu.
7. **Horizontalna brzina dizalice** (eng. S/R Machine Horizontal Velocity)– najveća brzina kojom dizalica putuje u horizontalnom smjeru izražena u ft/min.
8. **Vertikalna brzina dizalice** (eng. S/R Machine Vertical Velocity)– najveća brzina kojom dizalica putuje u vertikalnom smjeru izražena u ft/min.
9. **Horizontalno ubrzanje i usporenje brzine dizalice** (eng. S/R Machine Vertical accel/decel) – horizontalna promjena brzine dizalice izražena u  $\text{ft/sec}^2$
10. **Vertikalno ubrzanje i usporenje brzine dizalice** (eng. S/R Machine Vertical accel/decel) – vertikalna promjena brzine dizalice izražena u  $\text{ft/sec}^2$ . Napomena:

Promjena brzine obično je između 1 i 3 ft/sec<sup>2</sup>. Vrlo visoke promjene brzine naznačuju trenutnu promjenu brzine.

11. **Vrijeme izuzimanja** (eng. Pickup Time)– vrijeme potrebno da dizalice izuzme teret s lokacije.
12. **Vrijeme skladištenja** (eng. Deposit Time)– vrijeme potrebno da dizalice uskladišti teret na lokaciju.
13. **% složenih operacija** (eng. % Dual Command Ops) – Ovo je postotak vremena u kojem će dizalica uskladištiti ili izuzeti teret tijekom jednostavnog ciklusa. Složeni ili dvostruki ciklus predstavlja obavljanje obje operacije u jednom ciklusu.
14. **Maksimalni postotak korištenja** (eng. Maximum Allowable Utilization (%))– najveći postotak vremena u kojem će dizalica izvršavati operacije.
15. **Oblik regala** (eng. Rack Shape)– padajući izbornik s dvije opcije
  - a. Square-in-time – izračunava dimenzije regala (visinu i dužinu) tako da vrijeme potrebno da dizalica dođe do najudaljenije horizontalne lokacije bude ujedno i vrijeme koje je potrebno da dođe do najudaljenije vertikalne lokacije
  - b. Zadana visina – dopušta korisniku da unese željenu visinu regala, a duljinu izračunava softver, unosi se u feet
16. **Tip regala** (eng. Rack Type)– padajući izbornik s dvije opcije
  - a. Regal jedinične dubine – na jednu lokaciju u regalu može se uskladištiti samo jedan teret
  - b. Regal dvostruke dubine- na jednu lokaciju u regalu mogu se uskladištiti dva tereta Ovakav regal dopušta efikasnije iskorištenje skladišnog prostora, no može uzrokovati sporije vrijeme ciklusa zbog premještanja tereta kako bi se dosegli stražnji tereti
    - i. Korištenjem Regala dvostruke dubine otvara se pod-meni u koji je potrebno unijeti postotak saćastog gubitka. Ovo je postotak svih praznih lokacija u drugom sloju koje blokiraju tereti iz prvog sloja.



### 6.3.2. Dugmad

Enter the following Information

	Parameter	Value
1	Number of Storage/Retrieval Shuttles	
2	Number of Storage requests per hr	
3	Number of Retrieval requests per hr	
4	Maximum Storage Volume (units)	
5	Storage Cell Height with clearances (ft)	
6	Storage Cell Width with clearances (ft)	
7	S/R Machine Horizontal Velocity (ft/min)	
8	S/R Machine Vertical Velocity (ft/min)	
9	S/R Machine Horizontal accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )	
10	S/R Machine Vertical accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )	
11	Pickup Time (sec)	
12	Deposit Time (sec)	
13	% Dual Command Ops	
14	Maximum Allowable Utilization (%)	
15	Rack Shape	Square-In-Time(1)
16	Rack Type	Single Deep (1)

Calculator

Reset Solve Sensitivity Analysis

Slika 26. Korištenje dugmadi u softverskom paketu

1. **Očisti** (eng. Reset) – klikom na ovaj gumb obrisati će se svi podaci na radnim listovima „ASRS Design & Analysis“, „Sensitivity Analysis Summary“ i „Results History“
2. **Riješi** (eng. Solve) – kad se unesu svi parametri u radni list „ASRS Design & Analysis“, klikom na dugme izvršiti će se makro naredbe za rješavanje i određivanje optimalnog rješenja.
3. **Analiza osjetljivosti** (eng. Sensitivity Analysis) – Dostupno je pet analiza osjetljivosti za uspoređivanje broja prolaza, troškova, zahtjevima za propusnost, kapaciteta i postotak složenih ciklusa.
4. **Upitnici** – klikom na upitnik, otvoriti će se novi prozor s objašnjenjem pojedinog parametra.

## 6.4. Izlazni parametri (rezultati)

Softverski paket nudi dvije vrste rezultata. Osnovni rezultati prikazuju dimenzije regala, dok detaljni rezultati prikazuju operativne karakteristike povezane s predloženom konfiguracijom regala.

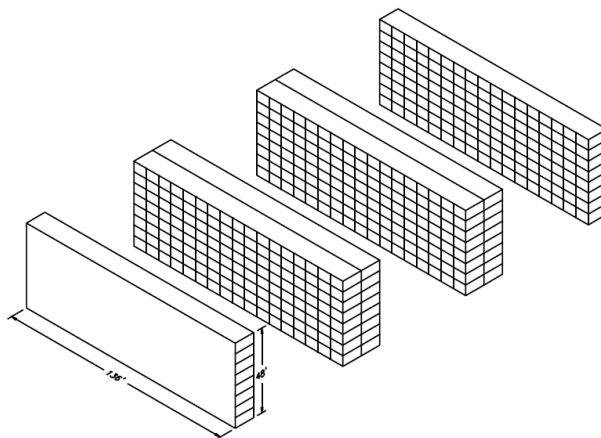
### 6.4.1. Osnovni rezultati

Osnovni rezultati sažimaju fizički oblik automatiziranog visokoregalnog skladišnog sustava. Dane su informacije vezane uz broj prolaza (eng. number of aisles), duljine (eng. length of rack) i visine (eng. height of rack) svakog regala te broja kolona (eng. number of columns per rack) i redova (eng. number of rows per rack) u regalu.

#### Results ?

Number of Aisles	3
Length of Rack (ft)	136.00
Height of Rack (ft)	48.00
Number of Columns per Rack	17
Number of Rows per Rack	8

Slika 27. Tablični prikaz osnovnih rezultata



Slika 28. Skica automatiziranog visokoregalnog skladišta

### 6.4.2. Detaljniji rezultati

Da bi se prikazali detaljni rezultati, označite kućicu „Prikaži detaljne rezultate“ (eng. Display Result Details). Ovdje su prikazane informacije vezane uz operativne karakteristike sustava poput prosječnog ciklusa ili propusnosti.

Display Result Details ☒

Storage openings per Aisle	272
Storage openings required per Aisle	266.67
Avg Time per request (sec)	30.28
Time Available per request (sec)	43.20
Avg Throughput (requests/hr)	285.36
Required Throughput (requests/hr)	200.00
Avg Time per request (sec) FCFS	30.28
Avg Time per request (sec) mod. FCFS	28.10
Avg Time per request (sec) Nearest Neighbor	26.83
Avg Time per request (sec) mod. Nearest Neighbor	25.60
Th (sec)	27.20
Tv (sec)	28.80
T (sec)	28.80
b	0.94
T(SC) (sec)	46.50
T(DC) (sec)	68.04
T(QC) (sec)	111.13
T(STC) (sec)	N/A

**Slika 29. Tablica detaljnih rezultata**

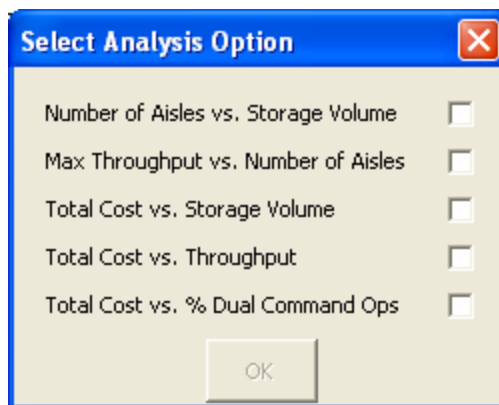
Tablica sadrži:

- Broj skladišnih lokacija po prolazu za proračunati oblik regala
- Broj potrebnih skladišnih lokacija po prolazu na temelju maksimalnog zadanog kapaciteta
- Prosječno vrijeme po zahtjevu (u sekundama) za određeni oblik regala. Vrijeme je proračunato po pravilu FCFS skladištenja i izuzimanja
- Dostupno vrijeme po zahtjevu (u sekundama) temeljeno na zadanoj propusnosti sustava (ukupni broj zahtjeva za skladištenje/izuzimanje po satu).
- Prosječna propusnost (zahtjeva po satu) za određeni oblik regala.
- Potrebna propusnost (zahtjeva po satu) zadana od strane korisnika.
- Prosječno vrijeme po zahtjevu (u sekundama) koristeći FCFS pravilo.
- Prosječno vrijeme po zahtjevu (u sekundama) koristeći modificirano FCFS pravilo. Vrijednost će biti prikazana samo u slučaju zadavanja višestrukih prihvatnih stanica.

- 
- Prosječno vrijeme po zahtjevu (u sekundama) koristeći NN pravilo. Vrijednost će biti prikazana samo u slučaju zadavanja višestrukih prihvatnih stanica.
  - Prosječno vrijeme po zahtjevu (u sekundama) koristeći modificirano NN pravilo. Vrijednost će biti prikazana samo u slučaju zadavanja višestrukih prihvatnih stanica.
  - $T_h$ , horizontalno vrijeme putovanja (u sekundama) potrebno da dizalica dođe od U/I mjesta do posljednje kolone (bez ubrzanja i usporenja)
  - $T_v$ , vertikalno vrijeme putovanja (u sekundama) potrebno da dizalica dođe od U/I mjesta do posljednjeg reda (bez ubrzanja i usporenja)
  - $T = \max(T_h, T_v)$ , faktor oblika regala u vremenu (u sekundama)
  - $b = \min(T_h/T, T_v/T)$ , faktor oblika regala
  - Očekivano vrijeme putovanja (u sekundama) za jednostruki ciklus,  $t_{jc}$ .
  - Očekivano vrijeme putovanja (u sekundama) za dvostruki ciklus,  $t_{dc}$ .
  - Očekivano vrijeme putovanja (u sekundama) za četverostruki ciklus,  $t_{qc}$ . Četverostruki ciklus može se izračunati samo za sustave s više od dvije prihvatne stanice.
  - Očekivano vrijeme putovanja (u sekundama) za šesterostruki ciklus,  $t_{xc}$ . Šesterostruki ciklus može se izračunati samo za sustave s više od tri prihvatne stanice.

### 6.4.3. Analiza osjetljivosti

Postoji pet različitih analiza osjetljivosti koje je moguće izvesti nakon obrade zadanih parametara klikom na gumb „Sensitivity Analysis“. Nakon toga otvara se meni gdje je potrebno odabrati željene analize.



**Slika 30. Meni s pet različitih analiza osjetljivosti sustava**

#### Broj prolaza u odnosu na skladišni kapacitet

(eng. Number of Aisles vs. Storage Volume)

Ovom analizom žele se pokazati promjene u sustavu u smislu potrebnog broja prolaza za određeni raspon kapaciteta. Unosom minimalnog i maksimalnog skladišnog kapaciteta vidi se utjecaj na oblik sistema. Analiza je vrlo korisna pri određivanju prijelomnih točaka kod kojih je potrebno da se sustavu dodaju dodatni prolazi.

#### Maksimalna propusnost u odnosu na broj prolaza

(eng. Max Throughput vs. Number of Aisles)

Odnos između propusnosti sustava i broja prolaza, može se vidjeti unosom minimalnog i maksimalnog željenog broja prolaza. U tablici i na grafu ispisuje se propusnost koju je moguće ostvariti za naznačen broj prolaza, a raspon se temelji na očekivanoj vrijednosti izračunatoj u osnovnoj analizi.

#### Ukupni troškovi u odnosu na skladišni kapacitet

(eng. Total Cost vs. Storage Volume)

Ova analiza pokazuje kako se mijenjaju ukupni troškovi sustava promjenom skladišnog kapaciteta. Unosom cijene dizalice i skladišne lokacije, te raspona skladišnog kapaciteta vidi se na koji način troškovi variraju povećanjem kapaciteta, odnosno u kojem trenutku i pri kojim parametrima je potrebno dodati još jedan prolaz, odnosno dizalicu.

#### Ukupni troškovi u odnosu na propusnost sustava

(eng. Total Cost vs. Throughput)

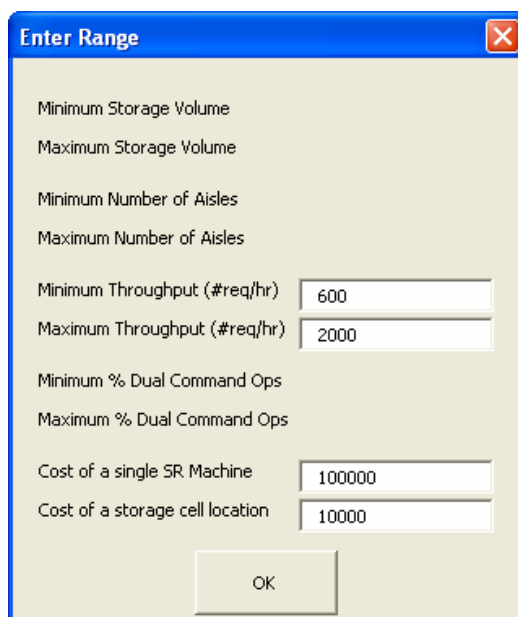
Unosom cijene dizalice i skladišne lokacije, te razmatranog raspona propusnosti sustava, ova analiza će pokazati koliko se mijenjaju ukupni troškovi povećanjem zadane propusnosti sustava. Osim toga vidi se u kojem trenutku i pri kojim parametrima je potrebno dodati još jedan prolaz, odnosno dizalicu.

#### Ukupni troškovi u odnosu na postotak dvostrukih ciklusa

(eng. Total Cost vs. % Dual Command Ops)

Unosom cijene dizalice i skladišne lokacije, te razmatranog minimalnog i maksimalnog postotka dvostrukog ciklusa vidi se koliko variraju ukupni troškovi sustava u odnosu na postotak dvostrukog ciklusa koji skladišni sustav može obaviti. Između ostalog, proračunata je i propusnost za pojedini postotak, odnosno je li potrebno u bilo kojem trenutku povećati broj prolaza.

Nakon odabira, pojavljuje se novi prozor s mjestima za unos pojedinih raspona za parametre odabrane analize. Potrebno je unijeti cijenu dizalice i skladišne lokacije, raspon skladišnog kapaciteta, broja prolaza, propusnosti ili postotka dvostrukih ciklusa. Za primjer prikazana je analiza „Ukupni troškovi u odnosu na propusnost sustava“.



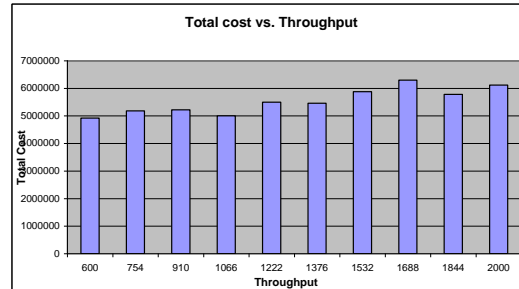
**Slika 31. Prozor za unos raspona propusnosti, te cijene dizalice i skladišne lokacije**

Nakon unosa parametara, analiza osjetljivosti će prikazati raspon rezultata u tablici i u grafu, na desnoj strani lista „ASRS Design & Analysis“.

Enter the following Information		
Parameter	Value	
1 Number of Storage/Retrieval Shuttles	2	
2 Number of Storage requests per hr	90	
3 Number of Retrieval requests per hr	110	
4 Maximum Storage Volume (units)	800	
5 Storage Cell Height with clearances (ft)	6	
6 Storage Cell Width with clearances (ft)	8	
7 S/R Machine Horizontal Velocity (ft/min)	300	
8 S/R Machine Vertical Velocity (ft/min)	100	
9 S/R Machine Horizontal accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )	3	
10 S/R Machine Vertical accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )	1	
11 Pickup Time (sec)	3	
12 Deposit Time (sec)	4	
13 % Dual Command Ops	60.00%	
14 Maximum Allowable Utilization (%)	80.00%	
15 Rack Shape	Fixed Height (2)	▼
15a Height (ft)	48	
16 Rack Type	Single Deep (1)	▼

## Results

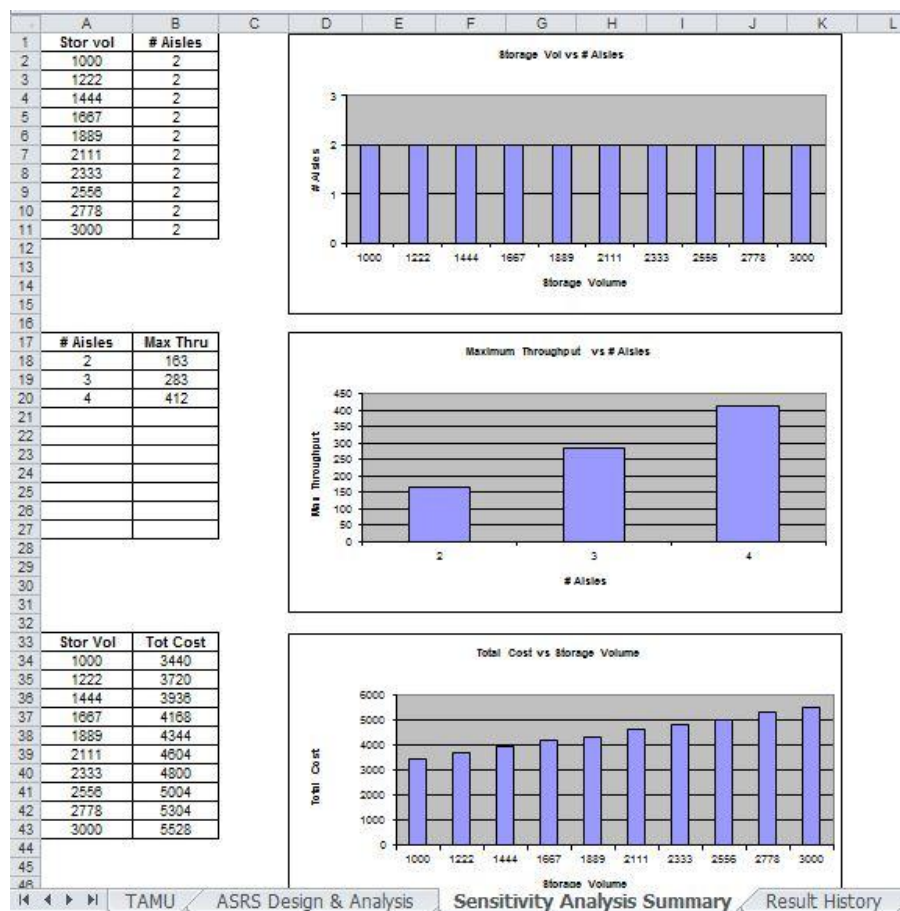
Number of Aisles	3
Length of Rack (ft)	136.00
Height of Rack (ft)	48.00
Number of Columns per Rack	17
Number of Rows per Rack	8

Display Result Details ☐

Thruput	Tot Cost	# Aisles
600	4920000	6
754	5180000	7
910	5220000	9
1066	5000000	10
1222	5500000	11
1376	5460000	13
1532	5880000	14
1688	6300000	15
1844	5780000	17
2000	6120000	18

Slika 32. Analiza osjetljivosti prikazana na desnoj strani lista "ASRS Design&amp;Analysis"

Sve analize automatski se snimaju na list „Sensitivity Analysis Summary“, a brišu se klikom na gumb „Reset“.



Slika 33. Sve analize osjetljivosti prikazane na listu „Sensitivity Analysis Summary“

#### 6.4.4. Povijest rezultata

Posljednji list u dokumentu je povijest rezultata (eng. Results History). Svaki put kad se klikne gumb „Riješi“ na listu „ASRS Design & Analysis“, svi ulazni i izlazni parametri se automatski snimaju na ovaj list. Ovo svojstvo dostupno je kako bi korisnik mogao usporediti rješenja za različite parametre.

	A	B	C	D	E
1	Total Saved Results :	4			
2	Result #:	1	2	3	4
3	Number of Storage/Retrieval Shuttles	2	2	2	2
4	Number of Storage requests per hr	60	60	60	60
5	Number of Retrieval requests per hr	80	80	80	80
6	Maximum Storage Volume (units)	2000	2000	2000	2000
7	Storage Cell Height with clearances (ft)	4	4	4	4
8	Storage Cell Width with clearances (ft)	8	8	8	8
9	S/R Machine Horizontal Velocity (ft/min)	300	300	300	300
10	S/R Machine Vertical Velocity (ft/min)	100	100	100	100
11	S/R Machine Horizontal accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )	1	1	100	1
12	S/R Machine Vertical accel/decel (ft/sec <sup>2</sup> )	1	1	100	1
13	Pickup Time (sec)	3	3	3	3
14	Deposit Time (sec)	4	4	4	4
15	% Dual Command Ops	0.6	0.6	0.6	0.6
16	Maximum Allowable Utilization (%)	0.8	0.8	0.8	0.8
17	Square-In-Time Racks (1)/Fixed Height Racks(2)	1	1	1	1
18	Height (ft)				
19	Single Deep Racks(1) / Double Deep Racks(2)	1	1	1	1
20	Honey Combing Loss (%)				
21					
22					
23	Retrieve Data				
24	Results				
25	Number of Aisles	3	3	3	3
26	Length of Rack	184	184	184	184
27	Height of Rack	60	60	60	60
28	Number of Columns per Rack	23	23	23	23
29	Number of Rows per Rack	15	15	15	15
30					
31	Result Details				
32	Storage openings per Aisle	690	690	690	690
33	Storage openings required per Aisle	666.67	666.67	666.67	666.67
34	Avg Time per request (sec)	38.71	38.71	35.06	38.71

Slika 34. List "Tablica rezultata"

Ukoliko korisnik želi ponovno koristiti neki od prethodnih parametara, potrebno je kliknuti gumb „Retrieve Data“ i unijeti željeni broj rezultata prikazan u drugom redu. Tako će se svi ulazni i izlazni parametri automatski vratiti na list „ASRS Design & Analysis“.

Ukoliko prilikom otvaranja programa kliknete „Da“ na pitanje želite li obrisati stare podatke (eng. Delete old data?) ili kliknete gumb „Očisti“ (eng. Reset) na glavnom listu, povijest rezultata će se obrisati.



## 7. ANALIZA RAZLIKE IZMEĐU POJEDINIH MODELA ZA ODREĐIVANJE RADNIH CIKLUSA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati pojedinih modela za izračun radnih ciklusa dizalice automatiziranog visokoregalnog skladišta. Uspoređivane su dizalice s jednostrukom prihvatnom stanicom za jednostavni i složeni radni ciklus. Uspoređivana su četiri skladišta različitih kapaciteta i oblika, prikazana u Tablica 2. Prikaz analiziranih skladišnih kapaciteta i oblika u SI sustavu mjera. Iz priloženog je vidljivo da su sva skladišta tipa 2. SIT<sup>5</sup> regali, skladišta tipa 1. su kraća i viša, dok su ona tipa 3. duža i niža.

Za potrebe ove analize napravljene su proračunske tablice i korišten je softverski paket ExASRS v2.0 koji koristi formule za pojedine modele dane u poglavlju 5. U softverskom paketu ExASRS v2.0 postoji ograničenje visine od 100 ft te su vremena radnih ciklusa za skladišta čija visina prelazi zadano ograničenje proračunata putem web stranice <http://www.warehouselayout.org/>, a u tablicama rezultata naznačena su zvjezdicom (\*). Web stanica je web alat napravljen od strane autora programskog paketa i testiranjem je utvrđeno da za sva skladišta daje iste rezultate te se rezultati smatraju važećima.

ExASRS v2.0 softverski paket koristi američki sustav mjera, pa je tokom izračuna bilo potrebno preračunati sve dimenzije u odgovarajuće oblike, kako bi se mogli usporediti rezultati. Podaci korišteni u programskom paketu preračunati su iz SI u američkog sustava mjera, a dimenzije su prikazane u Tablica 3. Prikaz analiziranih skladišnih kapaciteta i oblika u američkom sustavu mjera.

Zadana horizontalna brzina dizalice iznosi 3 m/s (600 ft/min), dok je vertikalna brzina 0,75 m/s (150 ft/min). Horizontalna promjena brzine, odnosno ubrzanje i usporenje dizalice iznosi 0,61 m/s<sup>2</sup> (2 ft/s<sup>2</sup>), dok je vertikalna promjena brzine 0,3 m/s<sup>2</sup> (1 ft/s<sup>2</sup>). Vrijeme odlaganja i izuzimanja iznosi 10 sekundi.

Zbog pojednostavljenja proračuna dimenzije skladišne lokacije odabrane su tako da ujedno odgovaraju broju redova i kolona u regalu, odnosno 1x1 m u SI sustavu mjera. U američkom sustavu mjera odabrane dimenzije skladišne lokacije iznose 3x3 ft.

---

<sup>5</sup> SIT – Square in time

**Tablica 2. Prikaz analiziranih skladišnih kapaciteta i oblika u SI sustavu mjera**

	Kapacitet (Q)	Duljina (L)	Visina (H)	Faktor oblika (b)
Skladište 1.1.	400	25	16	0,391
Skladište 1.2.	400	40	10	1
Skladište 1.3.	400	50	8	0,640
Skladište 2.1.	900	45	20	0,563
Skladište 2.2.	900	60	15	1
Skladište 2.3.	900	75	12	0,64
Skladište 3.1.	3600	90	40	0,563
Skladište 3.2.	3600	120	30	1
Skladište 3.3.	3600	150	24	0,64
Skladište 4.1.	8100	150	54	0,695
Skladište 4.2.	8100	180	45	1
Skladište 4.3.	8100	225	36	0,64

**Tablica 3. Prikaz analiziranih skladišnih kapaciteta i oblika u američkom sustavu mjera**

	Kapacitet (Q)	Duljina (L)	Visina (H)	Faktor oblika (b)
Skladište 1.1.	480	81	54	0,375
Skladište 1.2.	480	132	33	1
Skladište 1.3.	480	162	27	0,67
Skladište 2.1.	1080	150	66	0,57
Skladište 2.2.	1080	198	51	0,97
Skladište 2.3.	1080	252	39	0,62
Skladište 3.1.	4300	297	132	0,56
Skladište 3.2.	4300	396	99	1
Skladište 3.3.	4300	501	78	0,62
Skladište 4.1.	9700	495	177	0,7
Skladište 4.2.	9700	594	150	0,99
Skladište 4.3.	9700	747	117	0,63

## 7.1. Analiza rezultata za jednostruki radni ciklus

**Tablica 4. Prikaz rezultata za jednostruki radni ciklus (1. dio)**

		S 1.1.	S 1.2.	S 1.3.	S 2.1.	S 2.2.	S 2.3.
Duljina [m]	L	25	40	50	45	60	75
Visina [m]	H	16	10	8	20	15	12
Kapacitet	Q	400	400	400	900	900	900
Faktor oblika	b	0,391	1	0,64	0,563	1	0,64
MHI [s]	t <sub>jc</sub>	41,33	33,33	36,67	46,67	40,00	45,00
FEM 9.851 [s]	t <sub>jc</sub>	39,78	37,78	38,22	47,78	46,67	47,33
Bozer/White [s]	t <sub>jc</sub>	42,42	37,78	38,94	49,49	46,67	48,41
ExASRS v2.0 [s]	t <sub>jc</sub>	48,02	43,19	45,24	53,92	51,89	54,74

**Tablica 5. Prikaz rezultata za jednostruki radni ciklus (2. dio)**

	S 3.1.	S 3.2.	S 3.3.	S 4.1.	S 4.2.	S 4.3.
Duljina [m]	90	120	150	150	180	225
Visina [m]	40	30	24	54	45	36
Kapacitet	3600	3600	3600	8100	8100	8100
Faktor oblika	0,563	1	0,64	0,695	1	0,64
MHI [s]	73,33	60,00	70,00	92,00	80,00	95,00
FEM 9.851 [s]	75,56	73,33	74,67	101,33	100,00	102,00
Bozer/White [s]	78,97	73,33	76,83	103,59	100,00	105,24
ExASRS v2.0 [s]	82,82*	77,73	82,56	106,84*	104,46	110,36*

Analizom je utvrđeno da za dizalicu s jednostrukom prihvatnom stanicom u jednostavnom radnom ciklusu modeli FEM 9.851 i Bozer/White za sve veličine SIT regala daju identične rezultate. Kod regala tipa 1. i tipa 3. model FEM 9.851 izračunava malo kraće vrijeme ciklusa u odnosu na Bozer/White. S porastom veličine regala, povećava se i razlika trajanja ciklusa između dva spomenuta modela.

Vrijeme trajanja radnog ciklusa s uključenom promjenom brzine, očekivano je veće u odnosu na ostale modele zbog dodatnog vremena potrebnog da dizalica ostvari punu zadanu brzinu. Te vremenske razlike smanjuju se povećanjem kapaciteta, odnosno dimenzija regala. Iz dijagrama se jasno vidi da krivulja modela ExASRS prati krivulju modela Bozer/White, što je

logično jer je proračun za vrijeme trajanja radnog ciklusa izveden na temelju potonjeg modela.

Model MHI u svih dvanaest slučajeva u odnosu na ostale modele daje najlošije rezultate, odnosno predviđa najkraća vremena vožnje. Za razliku od FEM 9.851 koji se za SIT regale pokazao vrlo točnim, MHI model izračunava daleko najkraće trajanje vremena ciklusa dizalice. Porastom kapaciteta skladišta, odnosno kod regala većih dimenzija, veće su razlike u vremenima koja proračunava model MHI.

## 7.2. Analiza rezultata za dvostruki radni ciklus

**Tablica 6. Prikaz rezultata za dvostruki radni ciklus (1. dio)**

		<b>S 1.1.</b>	<b>S 1.2.</b>	<b>S 1.3.</b>	<b>S 2.1.</b>	<b>S 2.2.</b>	<b>S 2.3.</b>
<b>Duljina [m]</b>	L	25	40	50	45	60	75
<b>Visina [m]</b>	H	16	10	8	20	15	12
<b>Kapacitet</b>	Q	400	400	400	900	900	900
<b>Faktor oblika</b>	b	0,391	1	0,64	0,563	1	0,64
<b>MHI [s]</b>	$t_{dc}$	72,00	60,00	65,00	80,00	70,00	77,5
<b>FEM 9.851 [s]</b>	$t_{dc}$	69,74	64,00	66,00	80,22	76,00	79,001
<b>Bozer/White [s]</b>	$t_{dc}$	70,03	64,00	65,49	79,62	76,00	78,235
<b>ExASRS v2.0 [s]</b>	$t_{dc}$	80,19	73,68	76,24	87,45	85,03	88,69

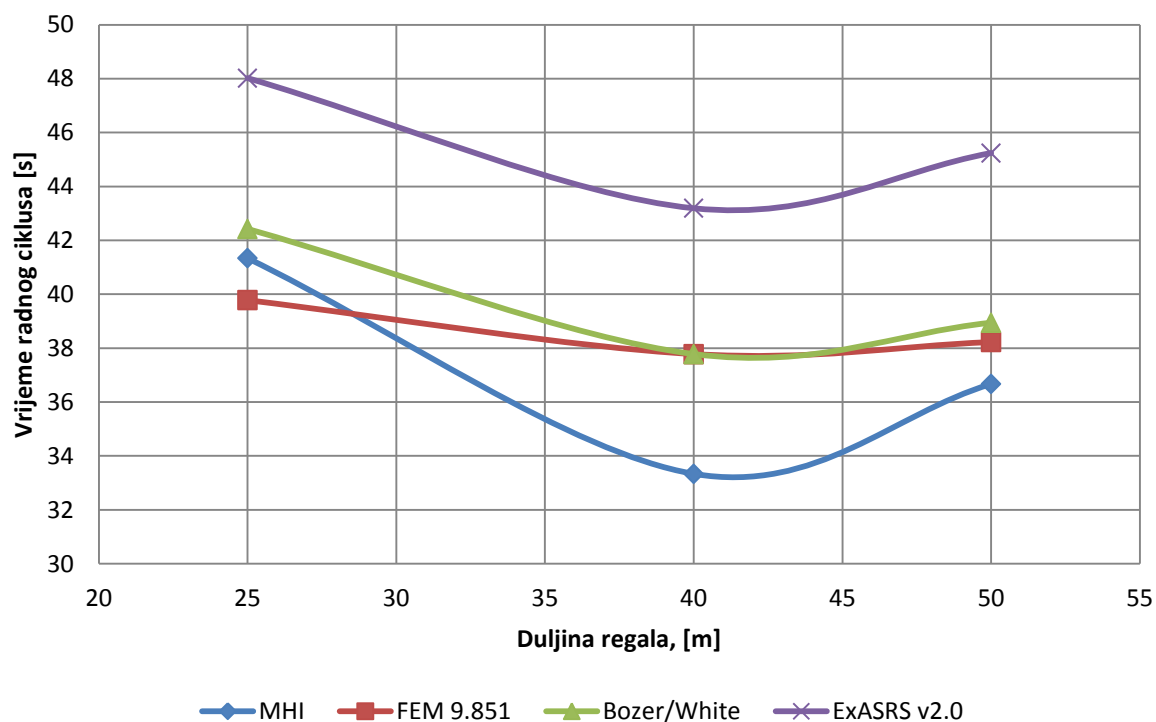
**Tablica 7. Prikaz rezultata za dvostruki radni ciklus (2. dio)**

	<b>S 3.1.</b>	<b>S 3.2.</b>	<b>S 3.3.</b>	<b>S 4.1.</b>	<b>S 4.2.</b>	<b>S 4.3.</b>
<b>Duljina [m]</b>	90	120	150	150	180	225
<b>Visina [m]</b>	40	30	24	54	45	36
<b>Kapacitet</b>	3600	3600	3600	8100	8100	8100
<b>Faktor oblika</b>	0,563	1	0,64	0,695	1	0,64
<b>MHI [s]</b>	120,00	100,00	115,00	148,00	130,00	152,50
<b>FEM 9.851 [s]</b>	120,45	112,00	118,00	154,93	148,00	157,00
<b>Bozer/White [s]</b>	119,25	112,00	116,47	152,58	148,00	154,71
<b>ExASRS v2.0 [s]</b>	125,99*	119,67	125,92	158,54*	155,69	163,28*

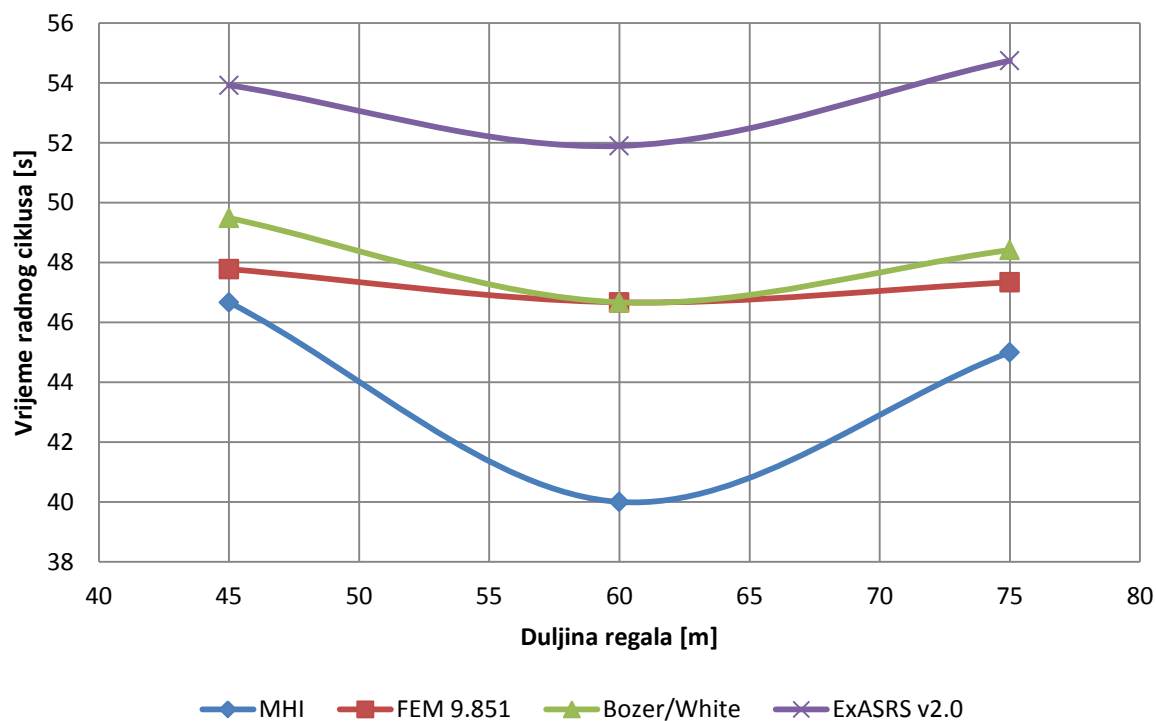
Kod složenih radnih ciklusa za dizalicu s jednostrukom prihvatnom stanicom model FEM 9.852 i model Bozer/White opet daju vrlo slične rezultate. Usporedbom ova dva modela vidljivo je da su rezultati za SIT regal ponovo identični, dok su za tip 1. i tip 2 dobivena vremena FEM 9.851 modelom malo veća od Bozer/White modela. Za manje regale ta razlika iznosi oko pola sekunde, no porastom kapaciteta, odnosno dimenzija regala, povećava se i razlika u dobivenim vremenima ciklusa.

Vremena dvostrukih radnih ciklusa izračunatih pomoću ExASRS v2.0 softverskog paketa, očekivano su veća u odnosu na ostale modele zbog dodatnog vremena potrebnog da dizalica ostvari punu zadanu brzinu. Vremenske razlike smanjuju se, kao i u slučaju jednostrukog radnog ciklusa povećanjem kapaciteta. U dijagramima dvostrukih radnih ciklusa vidljivo je da krivulja modela Bozer/White prati krivulju vremena dobivenih pomoću ExASRS-a.

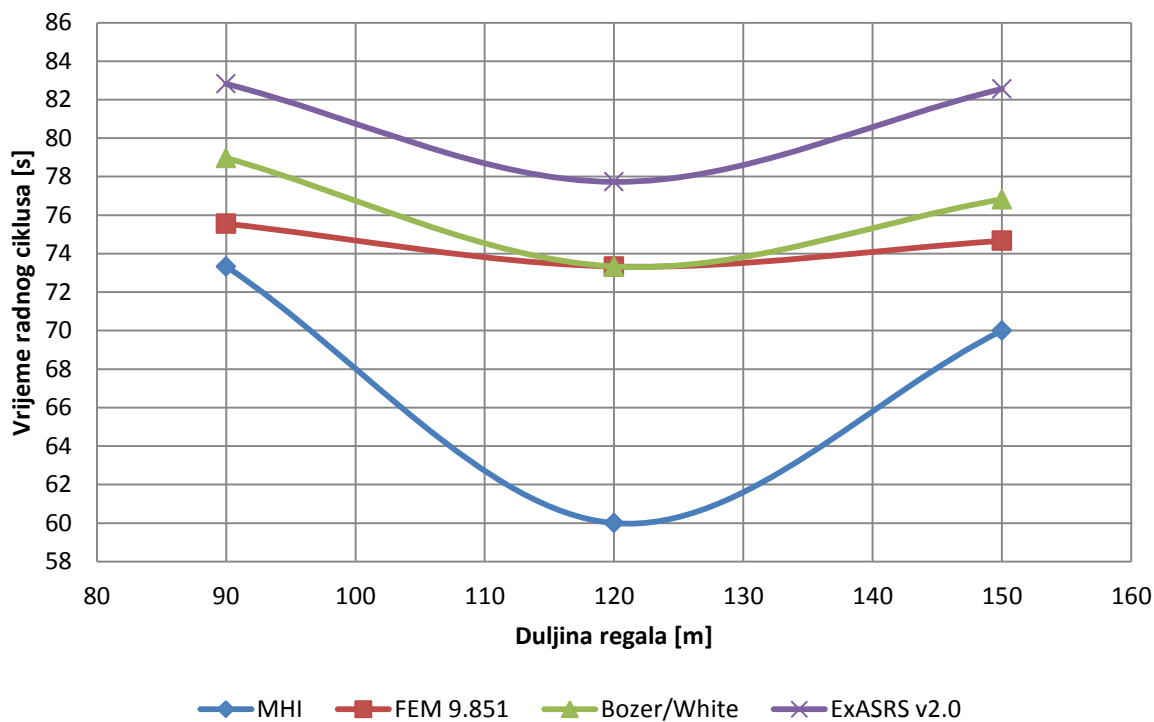
Model MHI u slučaju dvostrukih radnih ciklusa za sve veličine regala daje najlošije rezultate za SIT oblike, no za regale tipa 1. i tipa 2. proračunato vrijeme trajanja ciklusa je puno bliže ostalim modelima nego za jednostruki model.



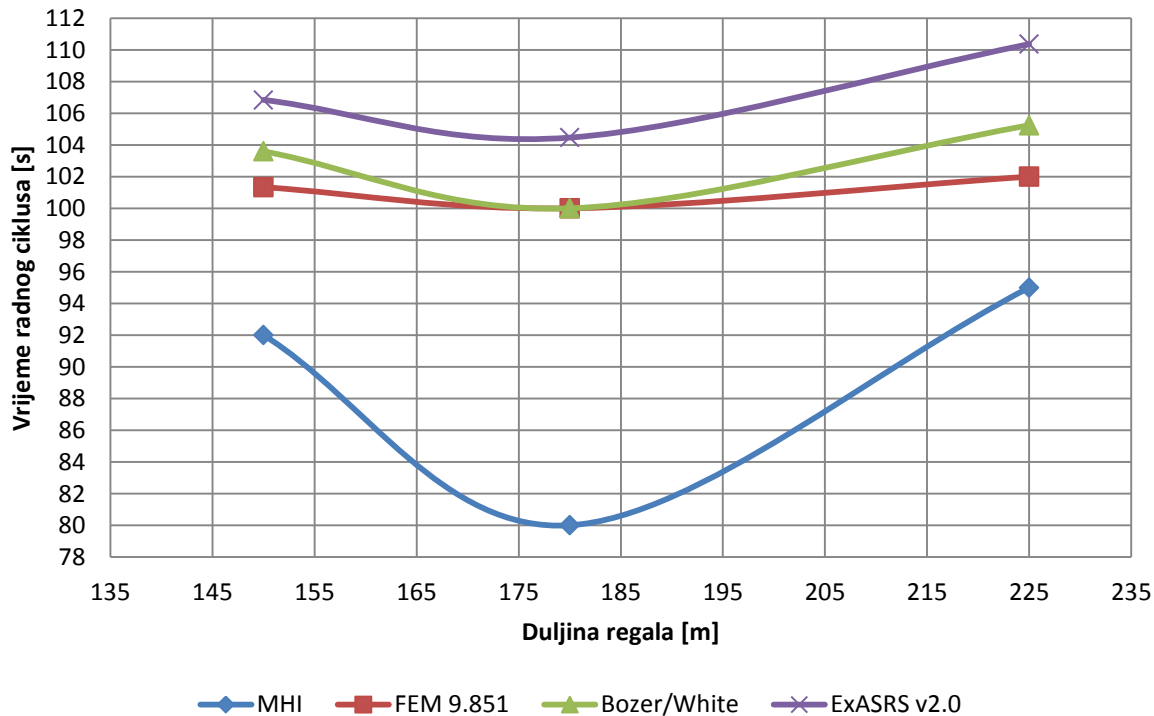
Slika 35. Grafički prikaz rezultata za skladište 1. za jednostavni ciklus



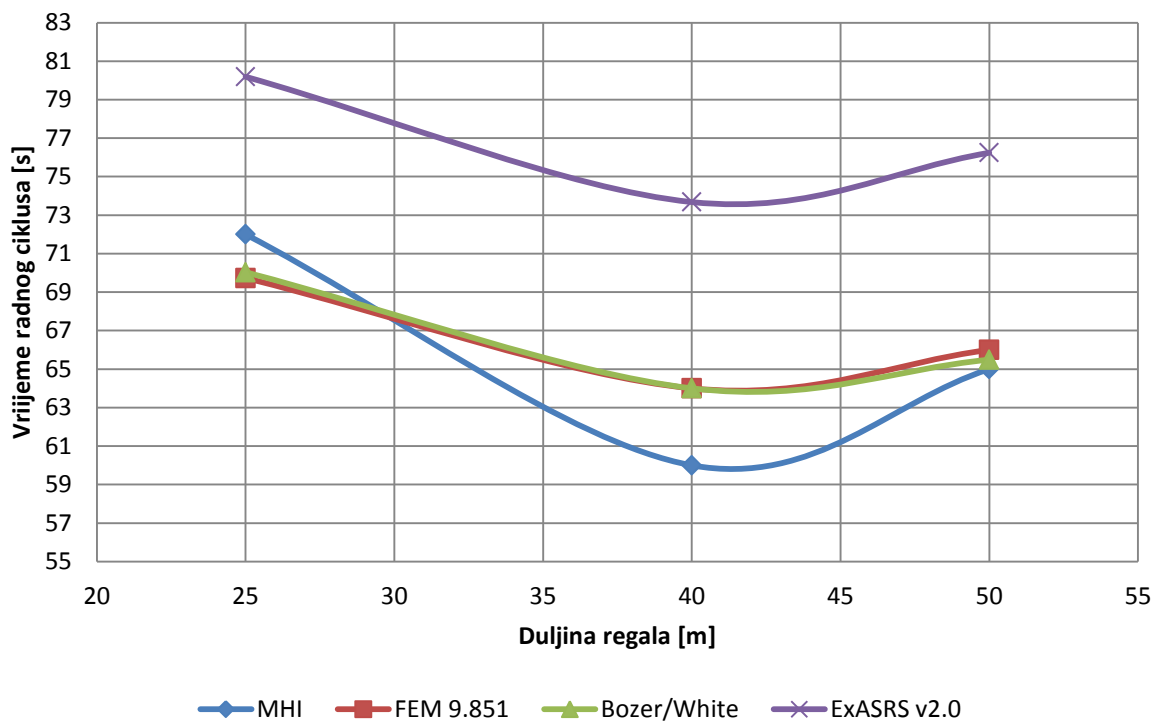
Slika 36. Grafički prikaz rezultata za skladište 2. za jednostavni ciklus



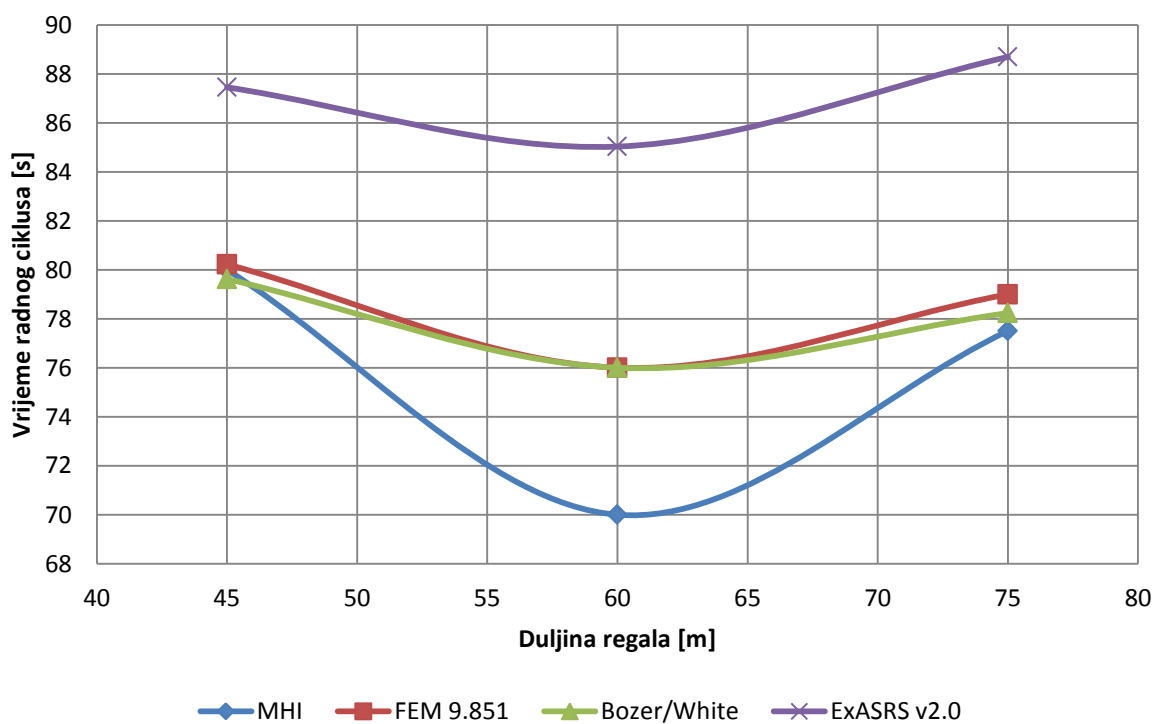
Slika 37. Grafički prikaz rezultata za skladište 3. za jednostavni ciklus



Slika 38. Grafički prikaz rezultata za skladište 4. za jednostavni ciklus

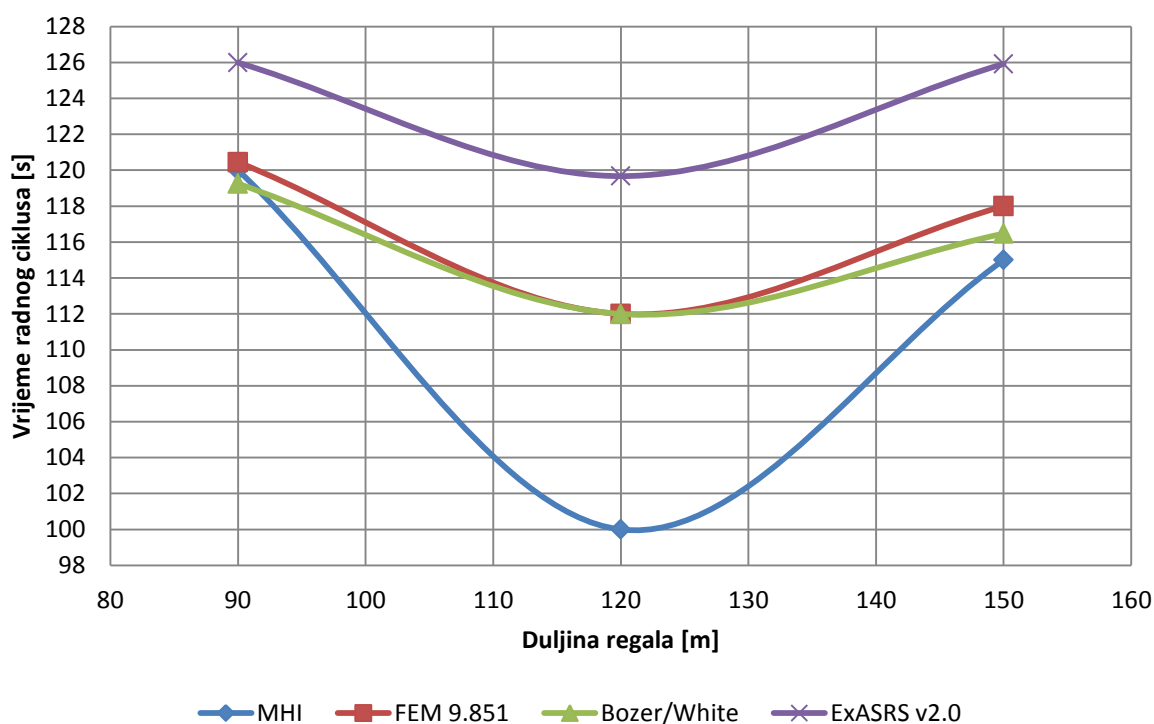


Slika 39. Grafički prikaz rezultata za skladište 1. za složeni ciklus

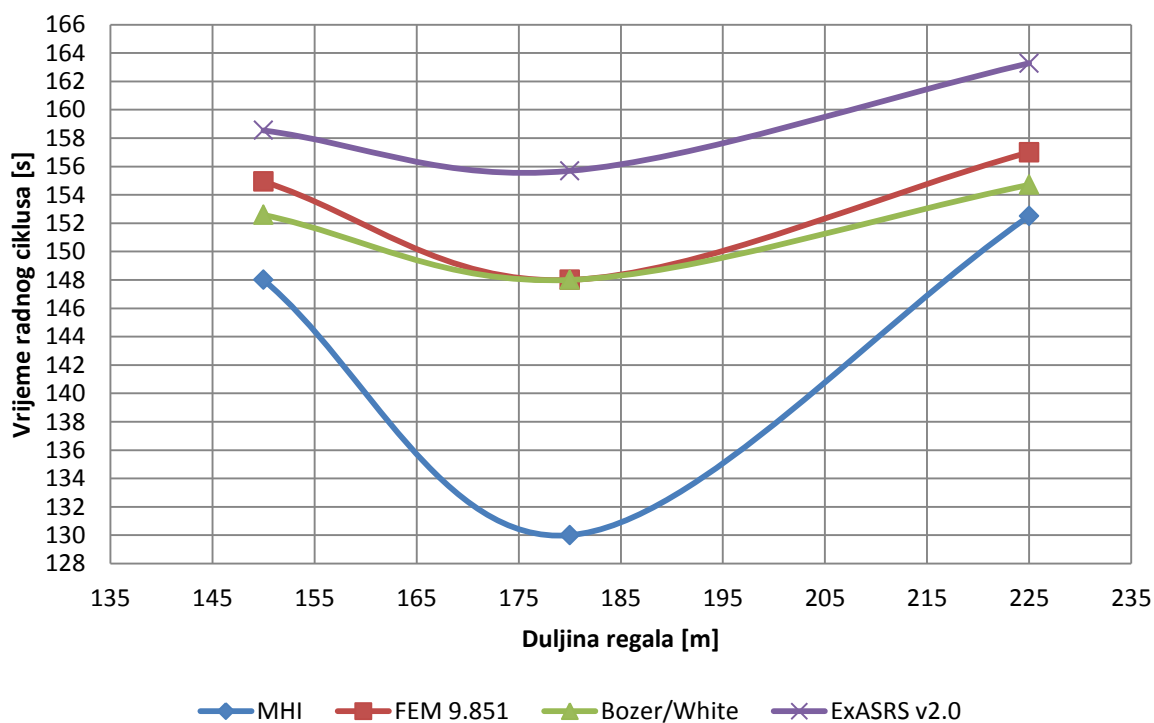


Slika 40. Grafički prikaz rezultata za skladište 2. za složeni ciklus





Slika 41. Grafički prikaz rezultata za skladište 3. za složeni ciklus



Slika 42. Grafički prikaz rezultata za skladište 4. za složeni ciklus

## 8. ZAKLJUČAK

Današnji trend u industriji je da roba bude na pravom mjestu u pravo vrijeme uz minimalne troškove poslovanja i zadovoljenje potreba kupaca. Zbog toga se pred logističare stavlja veliki izazov organizacije skladištenja koji postaje vrlo bitan i složen proces. Klasična skladišna rješenja više nisu u stanju biti konkurentna računalom upravljanim skladišnim sustavima. Zbog točnosti i sigurnosti naručene robe, uštede prostora i vremena te povećanja produktivnosti radnika, automatizirani skladišni sistemi koriste se u proizvodnim pogonima, distribucijskim centrima te veleprodajnim i maloprodajnim trgovinama.

U ovom radu kao rješenje predlaže se automatizirano visokoregalno skladište čija je automatizacija i točnost danas na vrlo visokoj razini i kontinuirano napreduje. Poboljšanje produktivnosti, povećanje kapaciteta, visok stupanj kontrole robe te smanjenje gubitaka i štednja energije, samo su neke od prednosti odabira ovakvog sustava.

Da bi sustav zadovoljio određene zahtjeve za propusnost i dimenzije skladišta, uzimajući u obzir ograničenja infrastrukture, potrebno je odrediti vrijeme trajanja radnih ciklusa dizalice.

Analizirani su jednostavni i složeni ciklusi postojećih modela i pokazalo se da relativno točno proračunavaju vrijeme trajanja radnog ciklusa za dizalice s jednostrukom prihvatnom stanicom. Model MHI pokazao se najslabijim, dok je model FEM 9.851 pokazao izuzetno dobre rezultate, slične modelu Bozer/White. Analize su potvrdile predviđanja da je veća razlika između modela radnog ciklusa bez promjene brzine i modela radnog ciklusa s promjenom brzine u regalima manjih dimenzija. Takve razlike opravdane su potrebnim vremenom vožnje da dizalica ostvari zadanu brzinu. Povećanjem dimenzija regala razlika se smanjuje, zbog toga što u tom slučaju dizalica više vremena vozi punom, odnosno zadanom brzinom.

Daljnji razvoj ovog rada može uključiti izradu simulacijskih modela za pojedina automatizirana visokoregalna skladišta, čime bi se dobili točniji rezultati za usporedbu stvarnih vremena s vremenima dobivenim pomoću modela za određivanje radnih ciklusa.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disk
- II. Tablice s rezultatima za analizirana skladišta

## LITERATURA

- [1] Olujić Č.: Rukovanje materijalom, Inženjerski priručnik, Treći svezak, Školska knjiga Zagreb, 2002.
- [2] Đukić, G.: Predavanja iz kolegija „Tehnička logistika“ i „Posebna poglavlja tehničke logistike“, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2010.
- [3] MHIA: Considerations for planning an automated storage/retrieval system, 1999.
- [4] Bozer, Y.A. i White, J.A.: Travel-time models for automated storage and retrieval systems, IIE Transactions, Vol. 16 (4) 329-338, 1984
- [5] DePuy, G.W.: Multiple Shuttle ASRS systems with acceleration/deceleration considerations, CICMHE/Material Handling Industries of America, Inc., 2007.
- [6] Meller, R.D. i Mungwattana, A.: Multi-shuttle automated storage/retrieval systems“, IIE Transactions, Vol. 29 (1), 925-938, 1997.
- [7] Chang, D.T., Wen, U.P. i Lin, J.T.: The impact of acceleration deceleration on travel-time models for automated storage-retrieval systems, IIE Transactions, Vol. 27, (1), 108-111, 1995.
- [8] Hwang, H. i Lee, S.B.: Travel-time models considering the operating characteristics of the storage and retrieval machine, International Journal of Production Research, Vol. 28 (10), 1779-1789, 1990.
- [9] MHIA: ExASRS v2.0 A user's manual for configuring preliminary designs, 2007.
- [10] Tanachoo, J.M.A. i Agee, M.H.: Unit load interfaces, 1981 National Material Handling Forum, 1981.
- [11] Sarker B.R. i Babu P.S.: Travel time models in automated storage/retrieval systems: A critical review, Int. J. Production Economics 40, 173-184, 1995.
- [12] [www.mhia.org](http://www.mhia.org) datum pristupa 16. srpnja 2012.
- [13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Automated\\_storage\\_and\\_retrieval\\_system](http://en.wikipedia.org/wiki/Automated_storage_and_retrieval_system) datum pristupa 16. srpnja 2012.
- [14] <http://www.logomatika.hr/> datum pristupa 14. kolovoz 2012.
- [15] <http://www.primatlogistika.hr/> datum pristupa 14. kolovoz 2012.